

MODELO PARA EL USO EFICIENTE DE UNA FLOTA DE ACARREO MINERO  
MINIMIZANDO LOS COSTOS DE OPERACIÓN

Alfredo Eduardo Quiroz Buelvas.

Esteban Gómez Pérez.

Mayo de 2017.

Tutor.

PhD. Alcides Santander.

Universidad del Norte.

División de Ingenierías.

TABLA DE CONTENIDO	Página
i. RESUMEN .....	8
ii. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	10
iii. OBJETIVO GENERAL.....	12
iv. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	12
v. METODOLOGIA .....	13
vi. MARCO CONCEPTUAL .....	14
1. MARCO TEÓRICO.....	20
1.1 El Sector Minero en Colombia .....	20
1.2 La Minería en Córdoba .....	21
1.3 Descripción de la Empresa: Cerro Matoso S.A. ....	22
1.4 Dimensionamiento de la Flota de Camiones .....	25
1.4.1 Dimensionamiento de Camiones en CMSA .....	27
1.4.2 Métodos Usados a Nivel Mundial.....	30
2. Desempeño de la Flota de Acarreo de CMSA en el Año Financiero 2016 .....	33
2.1. Disponibilidad.....	33
2.1.1. Flota CAT 777 .....	33
2.1.2. Flota CAT 773 .....	35
2.2. Utilización.....	37
2.2.1. Flota CAT 777 .....	37
2.2.2. Flota CAT 773 .....	41
2.3. Productividad de la Flota de Acarreo.....	43
2.4. Tiempos de Ciclos de Flota de Acarreo en el FY16 .....	44

2.4.1.	Flota CAT 777 .....	45
2.4.2.	Flota CAT 773 .....	46
3.	Modelo de Estimación de Costos de Acarreo .....	47
3.1.	Costos de Combustibles .....	47
3.2.	Costos de Mantenimiento .....	48
3.3.	Costos de Mano de Obra .....	49
4.	Modelo de Optimización .....	50
4.1.	Definición de Variables .....	50
4.2.	Función Objetivo .....	52
4.3.	Restricciones .....	52
4.3.1.	Producción .....	53
4.3.2.	Horas Requeridas .....	53
4.3.3.	Número de Operadores .....	53
4.3.4.	Número de Camiones .....	54
4.3.5.	Balance de Inventario: .....	54
4.3.6.	Restricciones de Inventario .....	54
4.3.7.	Restricción de Faltantes .....	54
5.	Elección del Método y Herramienta de Solución del Problema .....	55
6.	RESULTADOS .....	61
6.1.	Año Financiero 2016 .....	61
6.1.1.	Datos de entrada .....	61
6.1.2.	Estimación de Costos sin Optimizar .....	62
6.1.3.	Estimación de Costos Optimizados .....	64
6.2.	Año Financiero 2017 .....	66
6.2.1.	Datos de entrada .....	66

6.2.2.	Estimación de Costos sin Optimizar .....	66
6.2.3.	Estimación de Costos Optimizados .....	68
6.3.	Año Financiero 2018.....	70
6.3.1.	Datos de entrada.....	70
6.3.2.	Estimación de Costos sin Optimizar .....	70
6.3.3.	Estimación de Costos Optimizados .....	72
6.4.	Año Financiero 2019.....	74
6.4.1.	Datos de entrada.....	74
6.4.2.	Estimación de Costos sin Optimizar .....	74
6.4.3.	Estimación de Costos Optimizados .....	76
6.5.	Sensibilización de las Principales variables.....	78
7.	Plan de Acción .....	80
8.	CONCLUSIONES .....	82
ANEXO 1.....		84
9.	LISTA DE REFERENCIAS .....	102

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Caída del precio de un 64% entre 2011 y 2016.....	10
Figura 2. Esquema general de tiempos para equipos mineros en CMSA.....	14
Figura 3. Esquema de los intervalos del tiempo de ciclo de un camión minero.....	17
Figura 4. Dimensionamiento de una flota de camiones.....	26
Figura 5. Rutas de acarreo planeadas .....	27
Figura 6. Disponibilidad de la Flota CAT 777 en el año financiero 2016.....	34
Figura 7. Pareto de Paradas de Mantenimiento de la Flota CAT 777.....	35
Figura 8. Disponibilidad de la Flota CAT 773 en el año financiero 2016.....	36
Figura 9. Pareto de Paradas de Mantenimiento de la Flota CAT 773.....	36
Figura 10. Utilización de la Flota CAT 777 en el año financiero 2016.....	37
Figura 11. Pareto de Paradas de Proceso de la Flota CAT 777 en el Día.....	38
Figura 12. Pareto de Paradas de Proceso de la Flota CAT 777 en la Noche .....	39
Figura 13. Utilización de la Flota CAT 773 en el año financiero 2016.....	41
Figura 14. Pareto de paradas de proceso de la Flota CAT 773 en el día .....	42
Figura 15. Pareto de Paradas de Proceso de la Flota CAT 773 en la noche. ....	42
Figura 16. Corrientes de Movimiento de Material en CMSA .....	44
Figura 17. Límites del Gurobi Solver Engine.....	56
Figura 18. Pantalla de análisis del modelo.....	57
Figura 19. Pantalla de resultados .....	58
Figura 20. Evidencia de solución en Solver Premium.....	59
Figura 21. Reporte de lo ocurrido durante el proceso de optimización.....	60
Figura 22. Sensibilidad Principales Variables .....	78

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje de composición PIB en Colombia.....	21
Tabla 2. Variación porcentual en el PIB anual en Colombia.....	23
Tabla 3. Velocidad camiones Caterpillar 773 y 777en CMSA.....	28
Tabla 4. Estimaciones de tiempo de cargue en CMSA.....	28
Tabla 5. Estimación de Utilización y Disponibilidad de camiones en CMSA .....	29
Tabla 6. Paradas de proceso programadas en turno de día flota CAT777 .....	40
Tabla 7. Paradas de proceso programadas en turno de Noche flota CAT777 .....	40
Tabla 8. Tiempos de ciclo para flota CAT777.....	45
Tabla 9. Tiempos de ciclo para flota CAT773.....	46
Tabla 10. Consumo específico de combustible por tipo de flota.....	48
Tabla 11. Costos de mantenimiento por tipo de flota en porcentaje.....	48
Tabla 12. Recargo nocturno para los diferentes turnos.....	49
Tabla 13. Tamaño del Modelo de Optimización .....	55
Tabla 14. Datos financieros de entrada FY2016.....	62
Tabla 15. Datos operativos de entrada FY2016.....	63
Tabla 16. Resultados sin optimizar – Reales del FY2016 .....	63
Tabla 17. Estimación de costos del modelo sin optimizar FY2016-Línea Base .....	64
Tabla 18. Estimación de costos del modelo Optimizado FY2016.....	64
Tabla 19. Resultados de la optimización – Variables operativas FY2016 .....	65
Tabla 20. Datos operativos de entrada FY2017.....	67
Tabla 21. Resultados sin optimizar – Planeados para el FY2017.....	67
Tabla 22. Estimación de costos del modelo sin optimizar FY2017- Comparado con Línea Base .....	68
Tabla 23. Estimación de costos del modelo Optimizado FY2017.....	68

Tabla 24. Resultados de la optimización – Variables operativas FY2017 .....	69
Tabla 25. Datos operativos de entrada FY2018.....	71
Tabla 26. Resultados sin optimizar – Planeados para el FY2018.....	71
Tabla 27. Estimación de costos del modelo sin optimizar FY2018.....	72
Tabla 28. Estimación de costos del modelo Optimizado FY2018.....	72
Tabla 29. Resultados de la optimización – Variables operativas FY2018 .....	73
Tabla 30. Datos operativos de entrada FY2019.....	75
Tabla 31. Resultados sin optimizar – Planeados para el FY2019.....	75
Tabla 32. Estimación de costos del modelo sin optimizar FY2019.....	76
Tabla 33. Estimación de costos del modelo Optimizado FY2019.....	76
Tabla 34. Resultados de la optimización – Variables operativas FY2019 .....	77
Tabla 35. Sensibilidad Principales Variables FY18 .....	79
Tabla 36. Sensibilidad Principales Variables FY19 .....	80
Tabla 37. Plan de acción recomendado para la implementación del modelo optimizado .....	81

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1, Estadísticas para las variables de tiempo de ciclo para la Flota de Acarreo .....	84
--	----

## i. RESUMEN

El sector minero en los últimos años ha enfrentado una crisis reflejada en los bajos precios de los metales en los mercados internacionales, lo que ha obligado a las compañías a enfocarse en optimizar sus estructuras de costos para adaptarse a esta nueva situación (South32 Cerro Matoso 2016). Uno de los principales costos en la operación minera son los relativos al costo de transporte de material, el cual, según la literatura, representa entre el 40% al 50% de los costos totales de minería (Burt & Otros 2014). En Cerro Matoso (CMSA), se estima que este valor está cercano al 30% (Cerro Matoso 2012).

En CMSA históricamente el método de estimación de la flota de camiones se ha basado en cumplir con el movimiento planeado, teniendo en cuenta unas variables acordadas previamente, como productividad (t/h), utilización y disponibilidad de equipos. El resultado de un método así, puede que no garantice los mínimos costos para el cumplimiento del plan de minería. Con este trabajo de grado se busca optimizar el uso de la flota de acarreo garantizando unos costos mínimos de operación minera en CMSA cumpliendo con la producción planeada.

Para el desarrollo del modelo se usaron los datos de la Unidad de Negocio Mina para el año financiero 2016 (julio de 2015 a junio de 2016), esta información viene soportada del sistema de despacho de flota utilizado en CMSA, con lo cual se elaboró un modelo de optimización usando la herramienta Solver Premium, que permite trabajar un modelo de optimización con un gran número de variables y restricciones.

El modelo encontró que es posible ahorrar entre un 3% y 6% de los costos de acarreo, lo que no es un dato menor considerando que estos costos son los más representativos en la

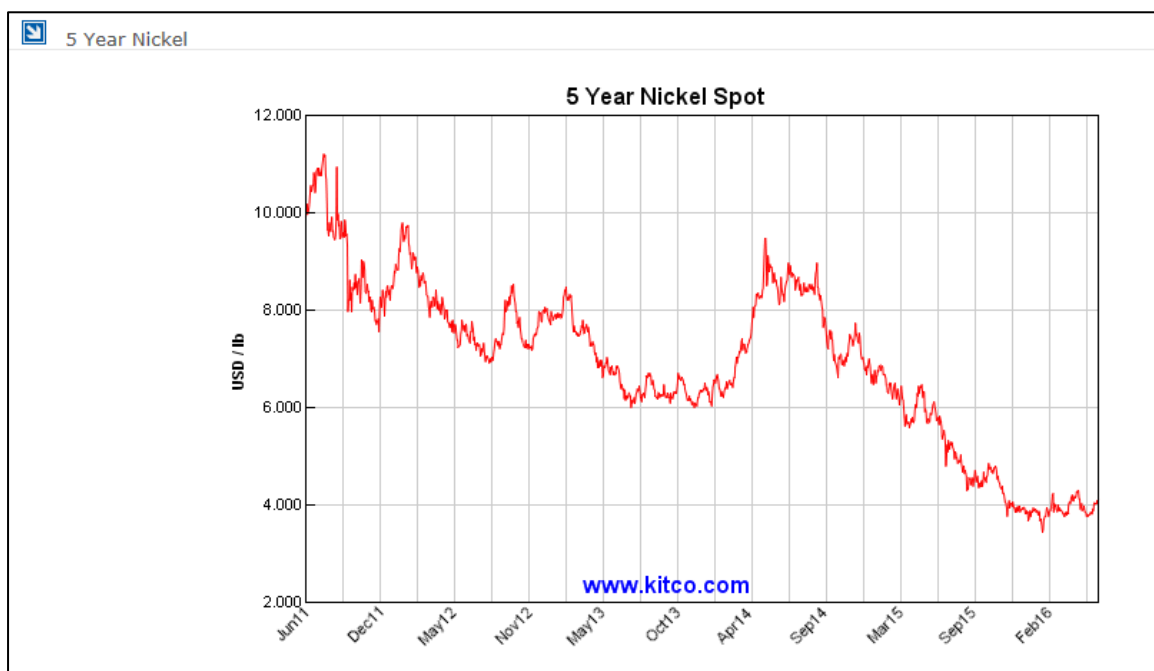


operación minera. Este ahorro es posible lograrlo reconfigurando el uso de la flota, y el esquema de rotación de turnos de los operadores, teniendo en cuenta las paradas planeadas y no planeadas (por ejemplo, la lluvia) y sin hacer gastos de capital.

Las variables de decisión que más impactan de una forma positiva en el ahorro de los costos de acarreo son el aumento de la productividad de los camiones, ahorros en el combustible y mantenimiento de los equipos y el aumento de la utilización. En los próximos años se deben buscar iniciativas que busquen la mejora en estas variables con lo cual es posible lograr ahorros entre el 13% y 16%.

## ii. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Bajo la premisa de la actual crisis del mercado del sector minero, las empresas están buscando minimizar sus costos, en el caso particular de la industria del níquel su precio ha caído alrededor del 64% (ver Figura 1) y no hay muchas perspectivas que indiquen que vuelva a subir, por lo menos en los próximos dos años, esto hace que CMSA tenga que optimizar su estructura de costos para adaptarse a las condiciones que la naturaleza del depósito y el mercado internacional están imponiendo (South32 Cerro Matoso 2016).



*Figura 1. Caída del precio de un 64% entre 2011 y 2016*

*Tomada: [http://www.kitcometals.com/charts/nickel\\_historical\\_large.html#5years](http://www.kitcometals.com/charts/nickel_historical_large.html#5years)*

El balance financiero de CMSA en el 2015 presentó pérdidas disminuyendo el monto de regalías e impuestos que se pagan al estado (South32 Cerro Matoso 2016, Informe de sostenibilidad 2015, pág. 4-5) lo cual indica que tiene que moverse rápido para cambiar en este

escenario, referente a lo que está en sus manos, que es disminuir sus costos, porque en lo referente al precio del níquel y a la naturaleza del depósito no se puede ejercer ningún control.

En este escenario hay que buscar oportunidades de ahorro de costos, uno de los costos de mayor impacto en el proceso minero es el acarreo de materiales que representan entre el 40% al 50% de los costos totales de una operación minera. (Burt & Otros 2014).

La pregunta que nos salta a la luz de esta situación es, ¿CMSA tiene la oportunidad de minimizar estos costos de acarreo?

Uno de los mayores problemas que enfrenta un ingeniero de mina es la decisión de establecer un número óptimo de camiones para cumplir con los objetivos de producción con el mínimo costo posible, en CMSA, esta estimación se ha realizado de una forma determinística, es decir, dado un plan de producción y unas productividades (t/h), con disponibilidades y utilizaciones de equipo constantes, se calcula el número de camiones necesarios para alcanzar la producción planeada requerida. Aunque en este cálculo tiene un peso importante la experiencia del personal que trabaja en la empresa, este método no garantiza que vamos a trabajar con los costos más bajos posibles, solo nos muestra un escenario para cumplir con los objetivos de producción.

Realizar una optimización para el uso eficiente de la flota de camiones puede resultar en un sustancial ahorro en los costos de operación, buscando maximizar la eficiencia del sistema de acarreo, es decir, que con los equipos mineros existentes se pueda cumplir la producción planeada con el mínimo de costo posible, aquí se puede analizar problemas como

en qué es mejor: si aumentar la disponibilidad de los equipos o su utilización desde el punto de vista de costos.

Además de lo anterior, a menudo los planes de minería cambian valores de producción (cantidad de material a minar y a mover) con el tiempo (año a año), por lo cual también se puede cumplir con los planes cambiando los valores de utilización y disponibilidad sin necesidad de salir a comprar o alquilar equipos, lo que puede resultar más costoso.

### iii. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un modelo de toma de decisiones de dimensionamiento de flota de acarreo y minimización de costos basado en optimización.

### iv. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar una revisión bibliográfica del estado del arte en el dimensionamiento de una flota de acarreo y cuáles serían sus aplicaciones en CMSA
- Construir un modelo de dimensionamiento de flota de camiones que sirva como herramienta de soporte para la toma de decisión en el departamento de planeación de CMSA
- Realizar análisis de sensibilidad de las variables que mayor impacto tienen en la productividad de los camiones y por ende en los costos de operación en CMSA.

## v. METODOLOGIA

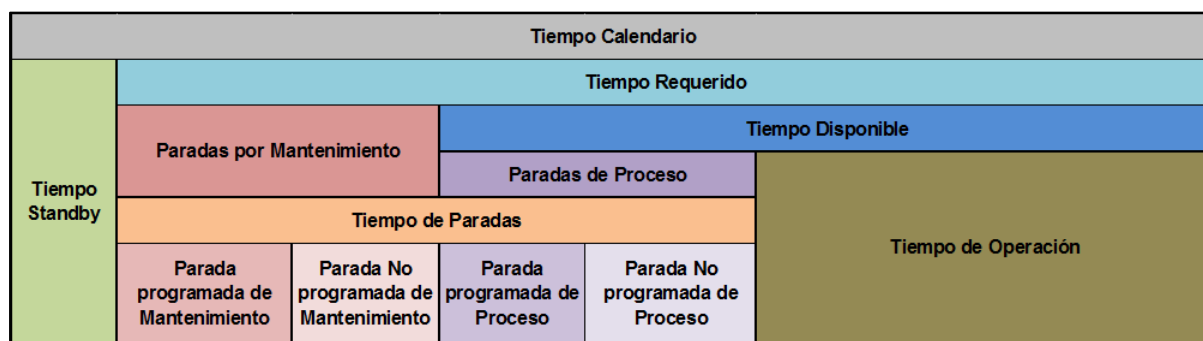
Este proyecto es una implementación o aplicación de un modelo de optimización en el proceso de dimensionamiento de flota en CMSA, para el cumplimiento de los objetivos del presente estudio se procede con el siguiente esquema metodológico:

1. Esquema de Recolección de datos: Aquí se busca obtener toda la información actualizada del sistema de acarreo de materiales de CMSA, la información recopilada corresponde al año financiero 2016, de julio 2015 a junio 2016.
2. Elección del método y herramienta de solución: Aquí se busca construir el modelo de optimización y seleccionar la herramienta apropiada para los datos particulares de CMSA.
3. Selección de métricas de medición: Se identificarán las variables que impactan en los resultados del modelo y se probará si el modelo es apropiado a las condiciones particulares de CMSA.
4. Probar la hipótesis: Se comparará el método usado actualmente en CMSA (caso base) con los resultados obtenidos con el modelo de optimización, y comprobar las oportunidades de ahorro de costos de producción.
5. Conclusiones: Se definen las oportunidades de ahorro identificadas y la mejor forma de implementar el modelo de optimización en CMSA, además de un análisis de las principales variables involucradas.

## vi. MARCO CONCEPTUAL

En esta sección se definen los principales conceptos que involucran el dimensionamiento de una flota de camiones.

**Esquema general de tiempos para equipo minero:** El estándar de tiempos para equipos mineros en CMSA, está basado en un estándar utilizado en la industria minera (Elevli & Elevli 2010), y está dado por la siguiente figura.



*Figura 2. Esquema general de tiempos para equipos mineros en CMSA*

**Tiempo Calendario (TC):** Tiempo máximo teórico durante el cual un Equipo podría prestar Servicios.

**Tiempo No Laborable (TStby):** Tiempo durante el cual no es posible operar los equipos debido a la ocurrencia de eventos de fuerza mayor o que, de conformidad con el contrato, justifican la no prestación o la suspensión de la prestación de los Servicios.

**Tiempo Requerido (TReq):** Tiempo durante el cual es necesario operar los equipos y que se obtiene de restarle al Tiempo Calendario (TC) el Tiempo No Laborable (TStby). La fórmula de cálculo del Tiempo Requerido se expresa de la siguiente forma:

$$T_{Req} = T_C - T_{Stby} \quad (1)$$

**Tiempo de Operación (TO):** Tiempo durante el cual un Equipo fue efectivamente utilizado para la prestación de los Servicios. Es obtenido utilizando el sistema de medición de tiempos del Sistema de Administración de Flota.

**Tiempo Disponible (TD):** Tiempo durante el cual un Equipo estuvo disponible para prestar Servicios durante un período determinado, la fórmula de cálculo del Tiempo Disponible se expresa de la siguiente forma:

$$T_{TD} = T_{Req} - T_{Nodisponible} \quad (2)$$

**Tiempo No Disponible (TNodisponible):** Tiempo durante el cual un Equipo no estuvo disponible para prestar Servicios durante un período determinado debido a fallas mecánicas, mantenimientos preventivos y mantenimientos correctivos.

**Disponibilidad (%D):** Tiempo durante el cual los Equipos estuvieron disponibles para ser operados durante un período, expresado en términos de porcentaje y obtenido al dividir el Tiempo Disponible (TD) sobre el Tiempo Requerido (TReq). La fórmula de cálculo de la Disponibilidad puede expresarse de la siguiente forma:

$$\%D = \frac{T_{TD}}{T_{Req}} = \frac{T_{Req} - T_{Nodisponible}}{T_{Req}} \quad (3)$$

**Utilización (%U):** Es el grado de uso real de un Equipo en función de la Disponibilidad del mismo, expresado en términos de porcentaje y obtenido al dividir el Tiempo Operativo (TO) del Equipo sobre el Tiempo Disponible (TD).

$$\%U = \frac{TO}{TD} \quad (4)$$

**Utilización Global (%OU):** La Utilización total que se le dio a los Equipos durante un período determinado, expresado en términos de porcentaje y obtenido al multiplicar la Disponibilidad de los Equipos por la Utilización de los mismos durante el período en que estuvieron disponibles. La fórmula de cálculo del *Overall Utilization* puede expresarse de la siguiente forma:

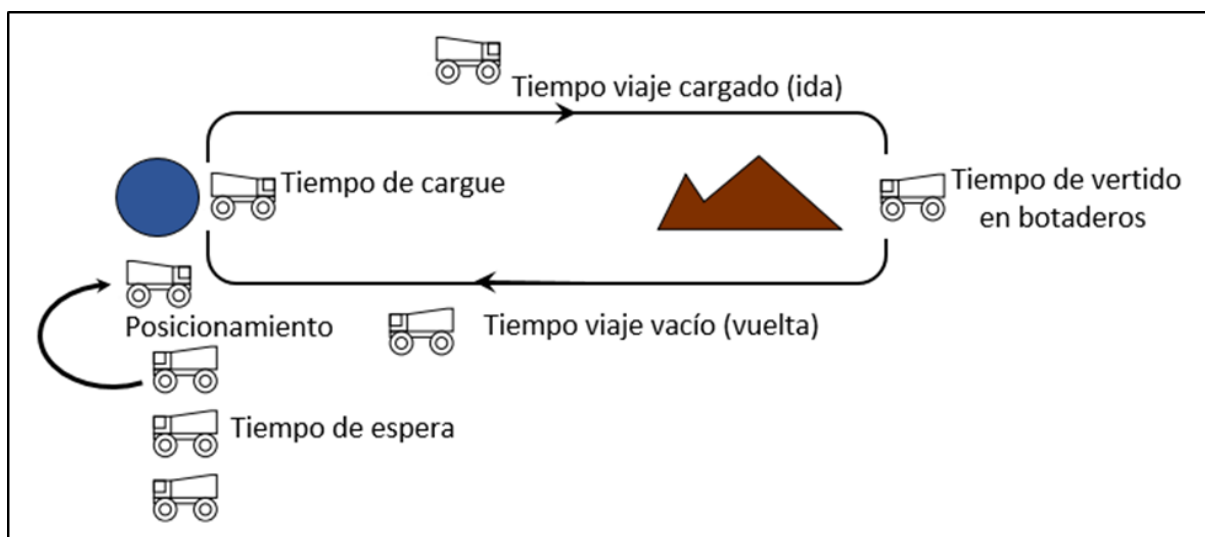
$$\%OU = \%D \times \%U = \frac{T_{TD}}{T_{Req}} \times \frac{T_{RT}}{T_{TD}} = \frac{T_{RT}}{T_{Req}} \quad (5)$$

### Estimación de productividad de los camiones

A la hora de estimar la productividad de los camiones mineros, hay cuatro factores básicos de los cuales depende el desarrollo de la operación: Tiempo de ciclo, Factores de eficiencia, Esponjamiento y densidad del material y capacidad nominal del equipo.



**Tiempo de ciclo:** El tiempo de ciclo por lo general se considera que empieza en el frente de cargue, donde el camión es llenado por el equipo de cargue, luego el camión viaja cargado por la ruta hasta el sitio de descarga, el cual en este caso puede ser un stock de mineral, un botadero de estéril o el patio de trituración, después de descargar el viaje, el camión viaja vacío de vuelta al frente de cargue, al llegar realiza las maniobras de posicionamiento (aculatamiento) frente al equipo de cargue para ser llenado de nuevo, aquí se considera que finaliza el ciclo. El tiempo de ciclo incluye tiempo de colas y espera en el frente de cargue y en los botaderos. En la Figura 3 se muestra un esquema del tiempo de ciclo.



*Figura 3. Esquema de los intervalos del tiempo de ciclo de un camión minero*

**Factores de eficiencia de la operación:** Este factor considera que el camión pertenece a un sistema y como tal queda sometido a pérdidas de tiempo debido a la supervisión, condiciones de trabajo, clima, experiencia del operador, etc. Todos estos retrasos son cuantificados en este factor.

**Factores de densidad y esponjamiento:** El tipo de material afecta el rendimiento de un equipo y está en función de la densidad *in situ* y la densidad suelta, es decir, cuando se excava un material, normalmente se fractura en partículas menores que no puede ajustarse entre sí como en su estado natural, provocando un aumento en el volumen que es llamado esponjamiento.

**Capacidad nominal del equipo:** Los fabricantes de maquinaria indican las capacidades de los camiones, generalmente de dos formas en peso y en volumen, por ejemplo, los camiones CAT 777, tienen una capacidad nominal de 91 toneladas, pero en volumen tienen 60 metros cúbicos, es decir que el acarreo del material es función de su densidad.

## **Métodos de Optimización**

El campo de la optimización ha crecido en las últimas décadas, han surgido muchas contribuciones retóricas, algorítmicas y computacionales de optimización para resolver diversos problemas en ingeniería y administración. El reciente desarrollo de los métodos de optimización puede ser divididos en determinísticos, estocásticos y heurísticos. (Lin & Otros 2012)

**Determinísticos:** Es un enfoque que se aprovecha de las propiedades analíticas del problema para generar una secuencia de puntos que convergen a una solución óptima global. Algunos métodos determinísticos son: programación lineal, programación entera, programación mixta – entera no lineal.

**Heurísticos:** el término heurístico viene del griego *heuriskein* que significa encontrar o descubrir, y en el campo de la optimización los enfoques heurísticos son más flexibles y

eficientes que el enfoque determinístico para manejar una variedad de problemas que necesitan ser solucionados eficientemente para encontrar muy buenas soluciones, aún si ellas no son óptimas. En estos métodos, la velocidad del proceso para obtener una solución es tan importante como la calidad de la solución obtenida. Ejemplos de procedimientos heurísticos son: Greedy Randomized Adaptive Search Procedures (GRASP) y General Variable Neighborhood Search (GVNS).

**Estocásticos:** Son métodos de optimización usados cuando los problemas envuelven incertidumbre (en nuestro caso puede ser la incertidumbre asociada a los tiempos de ciclo del camión). Dicha incertidumbre puede representarse por medio de distribuciones de probabilidad o a través de posibles escenarios. (Franco & Otros 2012)

## 1. MARCO TEÓRICO

En esta sección describiremos el sector y la empresa en la que se aplica el estudio, la teoría del dimensionamiento de flota de camiones, el método de estimación actual de CMSA y una revisión de la literatura con las últimas tendencias en este campo y finalmente, la optimización aplicada al dimensionamiento de una flota de acarreo de mina.

### 1.1 El Sector Minero en Colombia

El sector de la minería juega un papel significativo en Colombia por sus aportes a los ingresos corrientes de la Nación y de algunas regiones del país. Específicamente, la minería contribuye a las finanzas públicas con impuestos de renta, patrimonio e IVA, como el resto de las actividades productivas, así como con un aporte específico del sector constituido por las regalías.

Las regalías constituyen una de las contribuciones más importantes de las minerías a las finanzas públicas, especialmente en la medida en que representan un beneficio económico fundamental para algunos departamentos y municipios.

En la siguiente tabla se puede observar el comportamiento de las diferentes industrias en la composición del PIB Colombiano

<b>% Composicion PIB Colombia</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>
Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca	7,5%	7,1%	6,8%	6,3%	6,1%	6,3%	6,8%
Explotación de minas y canteras	7,8%	9,2%	12,2%	12,0%	11,1%	9,2%	7,5%
Industrias manufactureras	14,3%	13,9%	13,5%	13,4%	12,9%	12,4%	12,2%
Suministro de electricidad, gas y agua	3,9%	3,9%	3,7%	3,7%	3,6%	3,6%	3,7%
Construcción	8,4%	7,9%	8,1%	8,7%	9,6%	10,4%	10,6%
Comercio, reparación, restaurantes y hoteles	12,6%	12,7%	12,4%	12,4%	12,5%	12,8%	13,1%
Transporte, almacenamiento y comunicaciones	7,2%	6,9%	6,4%	6,2%	6,5%	6,8%	6,9%
Establecimientos financieros, seguros, actividades inmobiliarias y servicios a las empresas	21,1%	21,0%	20,1%	20,4%	20,3%	20,6%	21,0%
Actividades de servicios sociales, comunales y personales	17,1%	17,3%	16,6%	17,0%	17,4%	17,8%	18,2%
<b>Subtotal Valor agregado</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>

*Tabla 1. Porcentaje de composición PIB en Colombia*

*Fuente: <https://www.minminas.gov.co/boletines?idBoletin=257>.*

## 1.2 La Minería en Córdoba

La minería es la segunda actividad económica más importante en Córdoba, después de la agricultura. Mientras al principio de la década de los noventa la minería contribuía con un 18% del PIB de Córdoba, para el año 2005 incrementó su participación a un 25%.

Los principales minerales explotados en Córdoba son el níquel, carbón, oro, y materiales para la construcción. Las principales empresas localizadas en la región son: CMSA (níquel) en Montelíbano, y Argos (Carbón) en Puerto Libertador, las dos localizadas en la región del San Jorge, sur de Córdoba. La explotación por parte de estas empresas ha representado grandes beneficios para la región, en cuanto a inversión social, infraestructura y vinculación laboral, además del pago de regalías e impuestos.

Las regalías provenientes de la producción de níquel son distribuidas principalmente entre los Departamentos de Córdoba (62%) y Bolívar (0.91%). El porcentaje restante, al igual que en el caso del carbón, se distribuye entre distintos entes: la CAR, el Fondo Nacional de Regalías y el FONPET, figuran entre los de mayor participación.

### 1.3 Descripción de la Empresa: Cerro Matoso S.A.

BHPBilliton es una compañía multinacional del sector minero, el panorama mundial de este sector ha venido sufriendo una depresión y se han incrementado fuertemente las barreras políticas, económicas y sociales. Los ecologistas han incrementado sus esfuerzos para garantizar la sustentabilidad del Medio Ambiente, este estado de turbulencia ha llevado a grandes compañías a nivel mundial a repensar sus estrategias e incluso al cierre total.

Con este panorama las iniciativas de innovación deben estar a la orden del día, una de las estrategias de esta compañía fue la decisión de reorganizarse a nivel mundial, su acostumbrada estrategia de glocalización, estandarizando procesos e implementando sistemas de control estándar en todas sus operaciones, ya no es una estrategia que genera valor, por el contrario en operaciones ubicadas en países en desarrollo esta estrategia incrementa notablemente los costos de producción, así las cosas esta compañía toma entonces la decisión de segregar sus operaciones y dedicarse a los negocios de gran rentabilidad y de alto crecimiento y es entonces cuando se crea una nueva compañía llamada South32, con operaciones mineras en Australia, África y Suramérica. CMSA queda perteneciendo a esta nueva empresa.

CMSA es una empresa que integra una mina de extracción de níquel con el proceso de fundición de ferroníquel. El área de mayor influencia de CMSA se encuentra concentrada en el municipio de Montelíbano en el Departamento de Córdoba.

No obstante, las acciones de la compañía se extienden hasta los municipios de La Apartada y Puerto Libertador.

Durante más de 30 años de operación, CMSA se ha convertido en un importante productor mundial de aleación de hierro y níquel llamado ferroníquel, con un bajo contenido de impurezas.

En la siguiente tabla se observa la variación porcentual anual y se resalta el comportamiento negativo del sector minero en el PIB en los últimos años.

GRANDES RAMAS DE ACTIVIDAD ECONOMICA - Variaciones porcentuales anuales					
Series desestacionalizadas					
RAMAS DE ACTIVIDAD ECONOMICA	2011*	2012*	2013*	2014*	2015*
	Anual	Anual	Anual	Anual	Anual
AGROPECUARIO, SILVICULTURA, CAZA Y PESCA	9,29	-0,70	3,38	10,29	14,04
EXPLOTACIÓN DE MINAS Y CANTERAS	50,01	5,96	-1,07	-11,76	-14,11
INDUSTRIA MANUFACTURERA	10,02	6,13	3,48	2,79	3,54
ELECTRICIDAD, GAS Y AGUA	7,57	6,01	5,81	5,25	8,87
CONSTRUCCIÓN	16,59	15,53	18,34	15,03	7,47
COMERCIO, REPARACIÓN, RESTAURANTES Y HOTELES	11,27	6,91	8,97	8,69	7,60
TRANSPORTE, ALMACENAMIENTO Y COMUNICACIÓN	4,38	3,78	13,83	10,53	6,54
ESTABLECIMIENTOS FINANCIEROS, SEGUROS, INMUEBLES Y SERVICIOS A LAS EMPRESAS	8,41	8,79	6,94	7,72	7,80
SERVICIOS SOCIALES, COMUNALES Y PERSONALES	8,71	9,83	10,69	8,44	7,92
Subtotal Valor agregado	13,27	7,50	7,55	6,13	5,56
IVA no deducible	20,06	5,49	-5,55	11,79	7,91
Derechos e impuestos sobre las importaciones	11,41	-13,58	-1,94	10,84	16,79
Impuestos excepto IVA	21,63	6,31	24,43	7,58	4,43
Subvenciones	61,89	20,07	107,00	-35,90	10,34
Total impuestos	19,06	3,61	0,60	12,18	7,45
PRODUCTO INTERNO BRUTO	13,76	7,15	6,96	6,62	5,72
* Cifras provisionales.					
Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE.					

Tabla 2. Variación porcentual en el PIB anual en Colombia

CMSA, como todas las empresas del sector minero, ha pasado por problemas financieros debido a la crisis de los últimos años, la innovación entonces nace a partir de estas necesidades y South32 comienza con la implementación de su estrategia de optimización de sus operaciones, iniciando con la ruptura de paradigmas de operación, políticas de reducción de costos, aumentos en productividad, modificación de estándares de operación, simplificación de procesos y empodera a los gerentes de las diferentes Unidades de Negocio para que sean más autónomos, tomen más riesgos y se tomen decisiones específicas para cada área. Aunque este proceso no tiene una duración definida ya está comenzando a dar resultados positivos, tomará varios meses o incluso años para lograr establecer los resultados generales.

Es así como la Unidad de Negocios Mina viene implementando varias iniciativas que ayudan a gestionar mejor los costos, y uno de los costos que más impacto tiene es el de acarreo, el cual representa alrededor del 30% los costos de la operación minera para CMSA, por lo cual este trabajo se enfoca en ayudar a gestionar mejor este costo usando un modelo de optimización.

CMSA actualmente cuenta con una flota combinada de acarreo de material de 14 camiones CAT777 de 91 t. comprados en el año 2012, y 5 camiones CAT 773 de 55 t. estos con más de 10 años de antigüedad, se observa que un objetivo, en su momento, fue incrementar el tamaño de los camiones para disminuir los costos de operación. La flota de cargue está compuesta por 3 excavadoras HITACHI EX1900 y 1 excavadora HITACHI EX1200 además de 3 cargadores frontales CAT 990 y 1 cargador frontal CAT992, con esta flota se mueven alrededor de 20 millones de toneladas métricas húmedas (TMH).



Para los siguientes años financieros (2017, 2018 y 2019) la Mina ejecutará un movimiento total de alrededor de 24 millones de TMH por año y se continuará con la búsqueda de oportunidades de reducción de costos para ajustar el negocio a la realidad internacional del mercado del níquel.

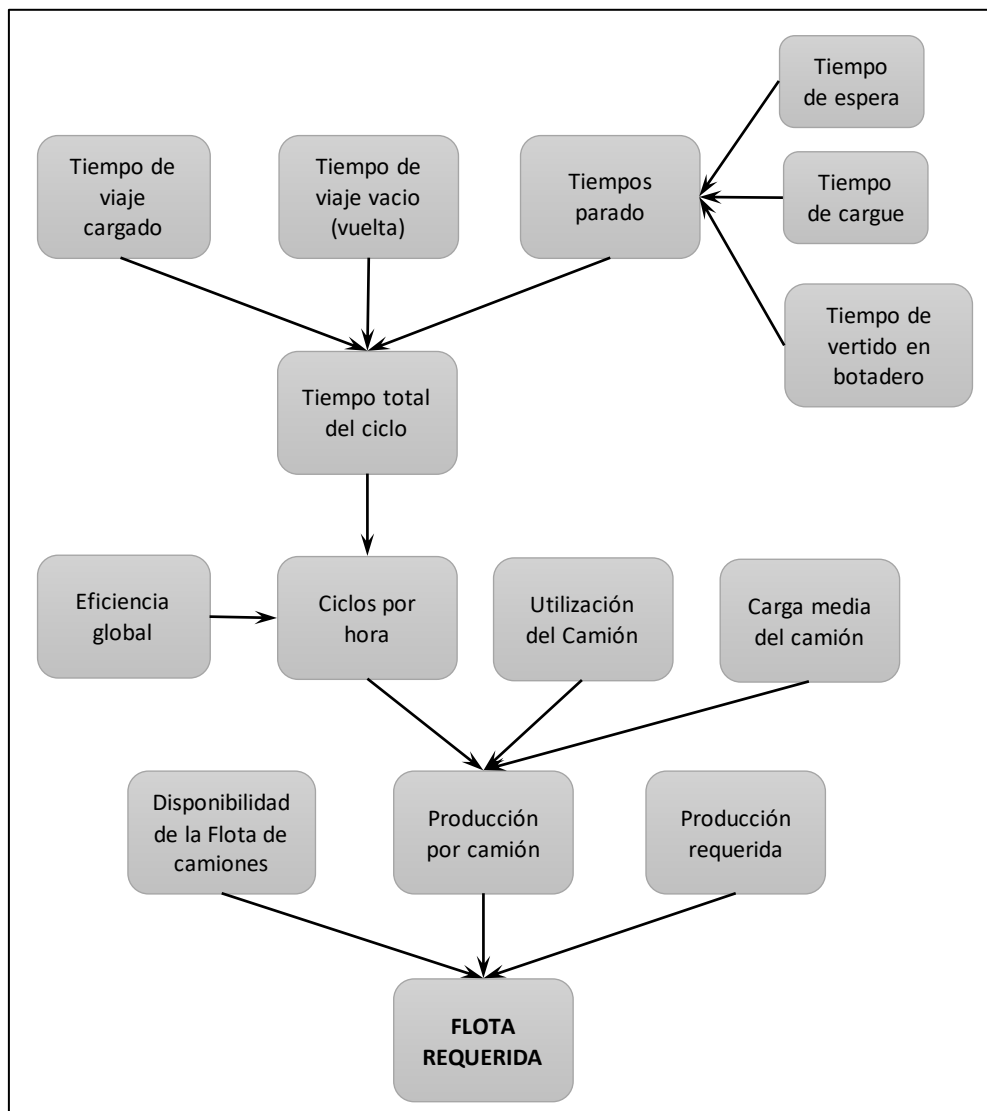
#### 1.4 Dimensionamiento de la Flota de Camiones

La explotación minera se puede definir como una sucesión de operaciones básicas que se repiten como un ciclo, las cuales son: Arranque, Cargue, Transporte y Vertido. Existen otras actividades de soporte y/o apoyo, cuyo objetivo es asegurar la mayor eficiencia posible de las operaciones básicas. El transporte o acarreo es la fase que representa los costos más significativos, cerca del 30% del costo total de la operación minera. El transporte se hace con el camión minero, y el dimensionamiento de flota de camiones es el número de camiones requeridos para cumplir con las necesidades de producción y está dada por la siguiente formula:

$$\# \text{ Camiones} = \frac{\text{Producción Requerida por hora}}{\text{Productividad por Camión por hora}} \quad (6)$$

De las variables de la Ecuación (6), la producción requerida por hora está dada por el plan de minado para cierto periodo, la cual indica los movimientos de estéril y mineral necesarios para cumplir los objetivos de producción. La productividad por camión por hora depende de la eficiencia de la operación, la carga media y el tiempo de ciclo, esto es ilustrado en la Figura 4. A esta variable de productividad es dónde se hace necesario hacer un análisis más detallado para gestionar mejor la flota de camiones; si se aumenta la eficiencia de los camiones se puede disminuir el número de camiones, por ejemplo en CMSA, se tenían 14

camiones de 91 t. y 3 camiones de 55 t., al aumentar la velocidad máxima de los camiones de 40 Km/h a 50 Km/h, y colocar el comedor más cerca de la operación, se logra alcanzar la producción con 12 camiones de 91 t., teniendo ahorros en mano de obra, mantenimiento y combustibles.

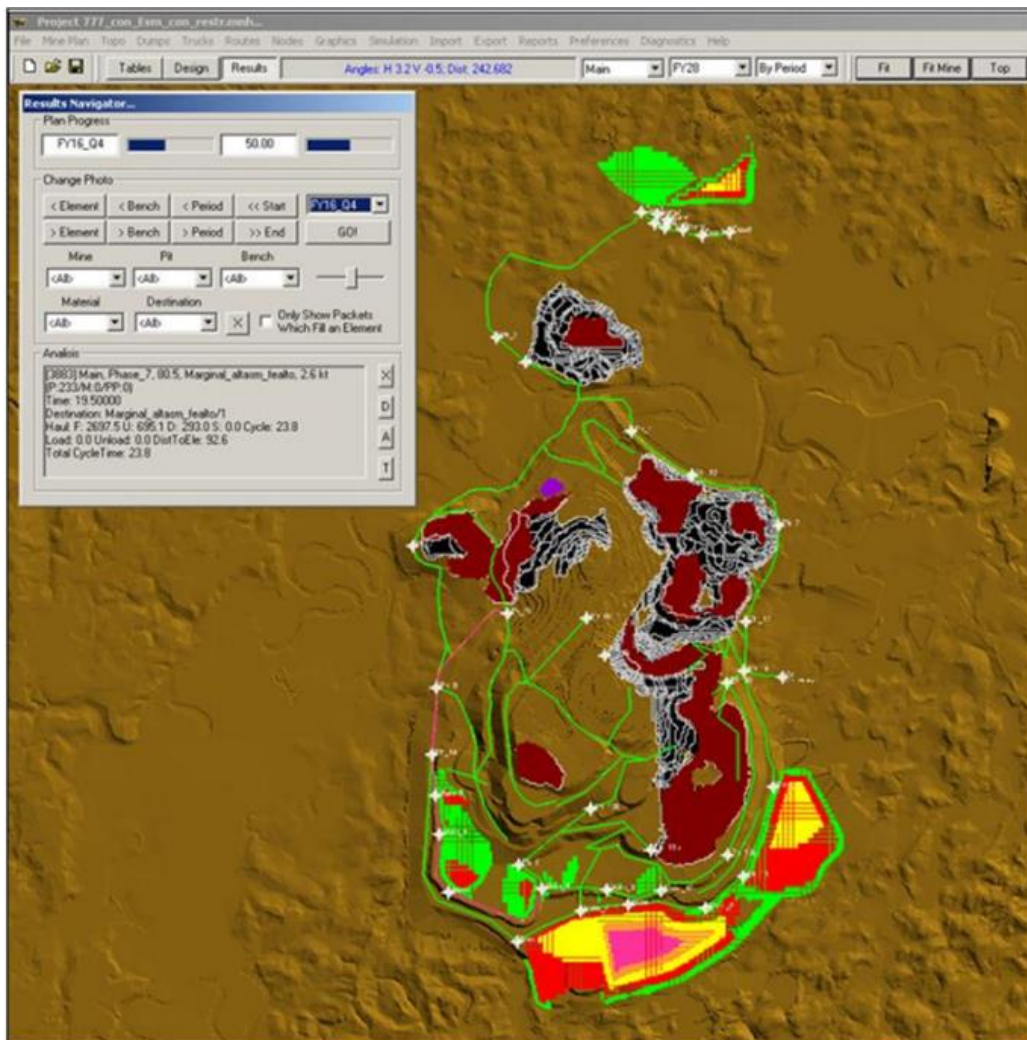


*Figura 4. Dimensionamiento de una flota de camiones*

*Tomado de: López Jimeno y Otros 1995*

### 1.4.1 Dimensionamiento de Camiones en CMSA

En CMSA el método de cálculo es muy similar al descrito anteriormente, se hacen estimaciones de cada intervalo del tiempo de ciclo, es decir los tiempos de cargue, viajando cargado, viajando vacío, tiempo de espera en frentes de cargue y maniobras en botaderos, esto de acuerdo a los frentes planeados, el plan de botaderos, los equipos seleccionados y los datos históricos, como es mostrado en la Figura 5 y las Tabla 3 ,4 y 5.



*Figura 5. Rutas de acarreo planeadas*

<b>Pendiente%</b>	<b>Cargado (km/h)</b>	<b>Vacío (km/h)</b>
10	10.4	20
8	11.5	22
4	17	24
2	17	24
0	17	24
-2	24	24
-6	19	22
-8	17	20
-10	15	15

*Tabla 3. Velocidad camiones Caterpillar 773 y 777 en CMSA*

<b>Equipo de Cargue</b>	<b>Tamaño de balde y Factor de llenado (m<sup>3</sup>) &amp; (%)</b>	<b>Tamaño del Camión (t)</b>	<b>Número de Pases (unidades)</b>	<b>Tiempo de Cargue * (min)</b>
Palas Hitachi EX1100	6.3 94%	55	5	3.16
Cargador Cat 990	8.4 88%	55	4	2.59
Palas Hitachi EX1100	11 74%	91	6	3.71
Cargador Cat 992	12.3 80%	91	5	3.67

*Tabla 4. Estimaciones de tiempo de cargue en CMSA*

Tipo de Camión	Producción por Unidad (t/h)	Horas de operación planeadas por turno	Horas de operación planeadas por año *	Disponibilidad planeada (%)	Horas de operación por año (h)	Capacidad de producción anual (Mt/año)
		(h)	(h)			
55 t – Cat 773	Variable	6.94	7,141	85%	6,070	Variable
91 t – Cat 777	Variable	6.94	7,141	85%	6,070	Variable

*Tabla 5. Estimación de Utilización y Disponibilidad de camiones en CMSA*

*\*Incluye 8% de tiempo parado por lluvia*

Basados en los anteriores datos de tiempos de ciclos, utilización y disponibilidades se calculan las productividades de los equipos de acarreo, y éstas son usadas para estimar las horas de operación requeridas de camión y con esto determinar la flota de camiones requerida.

Este método usado en CMSA es lo que actualmente se utiliza en la industria minera, el cual se soporta con en el uso de una hoja de cálculo y la dependencia fuertemente de la experiencia de los ingenieros involucrados en el proceso. Esto es un método determinístico y está basado en unos valores de disponibilidad y utilización constantes, lo que nos da un solo resultado, que está en función de cumplir la producción sin tener en cuenta el costo, es decir este método no garantiza trabajar eficientemente para minimizar los costos, que en la actual crisis del sector es lo que se debe buscar para garantizar la supervivencia de las empresas mineras. Aquí hay una buena oportunidad de buscar una herramienta que ayude desde la planeación a gestionar mejor los costos de operación.

#### 1.4.2 Métodos Usados a Nivel Mundial

En los comienzos de la gran minería se buscó minimizar los costos de operación aumentando la capacidad de los camiones hasta llegar a 350 t, esto tuvo su límite porque a más tamaño, se incrementa los costos de mantenimiento de las vías, se baja la flexibilidad de las maniobras e incrementa los costos de mantenimiento de los equipos. Esto llevó a que la estimación del dimensionamiento de la flota se hiciera con otros métodos más apropiados para gestionar los costos.

Muchos métodos para la selección y el dimensionamiento de flota han sido reportados en la literatura, incluyendo Programación Lineal, Simulación, Teoría de Colas, Algoritmos genéticos, etc. Estos modelos siempre caen dentro de las categorías de determinísticos, estocásticos y heurísticos, vamos a revisar algunos de ellos.

**Métodos estocásticos:** En estos métodos para el dimensionamiento de flota destacan la teoría de colas y la simulación. Por ejemplo, las teorías de cola han sido ampliamente usadas para analizar el desempeño de los sistemas pala – camión (Rodriguez, D. 2013), los cuales los camiones (clientes) transportan material a un destino final en una ruta consistente de una red de caminos. Ejemplo de resultados numéricos en una mina en Australia, muestra que ignorar las colas ha sobrestimado la producción alrededor del 8% (Neuwan and et al 2010).

**Métodos Heurísticos:** Se han trabajado el dimensionamiento de flota de camiones con modelos heurísticos (Souza y otros 2010) colocando como objetivo la optimización de la extracción de mineral en las minas al minimizar el número de camiones sujeto al cumplimiento

de la producción requerida y a los requerimientos de calidad del mineral (similar al problema en CMSA), de acuerdo a los autores esto es un problema NP-Hard (nondeterministic polynomial time problem), así que la estrategia heurística es apropiada. Se presenta un algoritmo híbrido que combina las características de dos procedimientos meta heurísticos: GRASP y GVNS. El algoritmo fue validado usando el software de optimización comercial CPLEX.

**Otros Modelos:** Se han desarrollado algoritmos genéticos basados en programación lineal (Naoum and Haidar 2000) para escoger el conjunto de equipos que minimiza los costos y satisface los requerimientos de producción, con límites mínimos y máximos de número de equipos, horas de operación de los equipos y duración de la vida de mina.

Otros modelos de programación lineal también han incorporado minimizar los costos de operación como función objetivo en el dimensionamiento de flota de camiones (Burt et al. 2005), sujeto a la capacidad de los equipos, tiempo de ciclo, eficiencia de la flota y los requerimientos de producción, encontrando que los costos operacionales incrementan y la productividad disminuye con la edad de los equipos de una forma no lineal.

También se han usado combinaciones de modelos estocásticos y determinísticos (Ta et al. 2005), formulando el problema de asignación de camión como un modelo de optimización estocástica de oportunidad – restringida (chance-constrained) que tiene la capacidad de incorporar parámetros inciertos como tiempos de carga de camión y tiempos de ciclos. El tipo y el número de camiones asignados a las palas son las variables de decisión, el objetivo es minimizar los costos de operación y de capital sujeto a la producción requerida, capacidad de las palas y disponibilidad de camiones. El paso crucial de la solución del problema de

oportunidad – restringida (chance-constrained) es convertir las restricciones a una forma determinística al identificar niveles de confianza que deben ser satisfechos. Al parecer, la técnica es sencilla de implementar y posee tiempos de cálculo razonables, que lo hace aplicable a los problemas en tiempo real.



## 2. Desempeño de la Flota de Acarreo de CMSA en el Año Financiero 2016

En esta sección describiremos el comportamiento de las principales variables de la flota de acarreo en CMSA en el año financiero 2016, tales como disponibilidad, utilización y tiempos de ciclos. Todos los datos fueron capturados del sistema de despacho de flota. Se hará el análisis para los dos tipos de camiones existentes en CMSA, los CAT777, de 91 t. de capacidad, que son usados para mover la producción, es decir para mover los materiales que son removidos de la mina y trasladados al patio de trituración, a los stocks de mineral y a los botaderos de estéril. Y los CAT773, de 50 t. de capacidad, usados para mover los materiales rechazados por la planta, como la escoria, el rechazo de clasificación (*Upgrading*), los lodos y los sobre tamaños del patio de trituración.

En el período en mención hubo cambios en las jornadas de trabajo, ya que pasamos de turnos de 8 h a 12 h, esto con el fin de aumentar la utilización de los equipos, se asume que esta configuración seguirá en los próximos años, se estandarizaron los datos para los períodos de día (7 a.m. a 7 p.m) y noche (7 p.m a 7 a.m.).

### 2.1. Disponibilidad

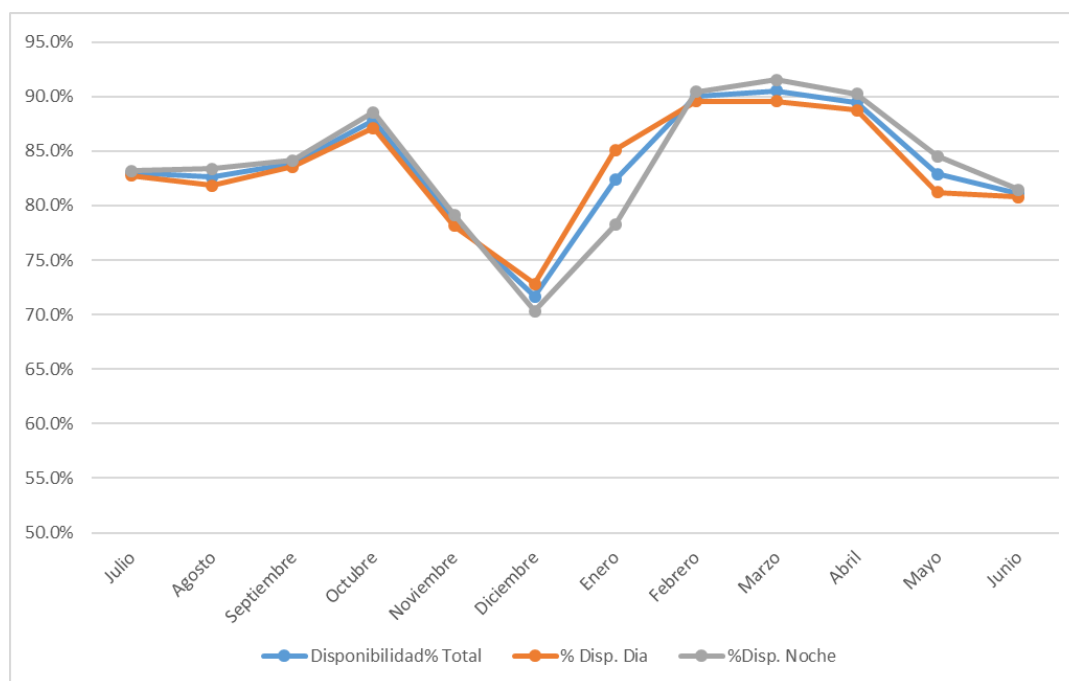
A continuación, se presenta el desempeño de disponibilidad de las dos flotas para el período de Julio de 2015 a junio de 2016 (año financiero 2016).

#### 2.1.1. Flota CAT 777

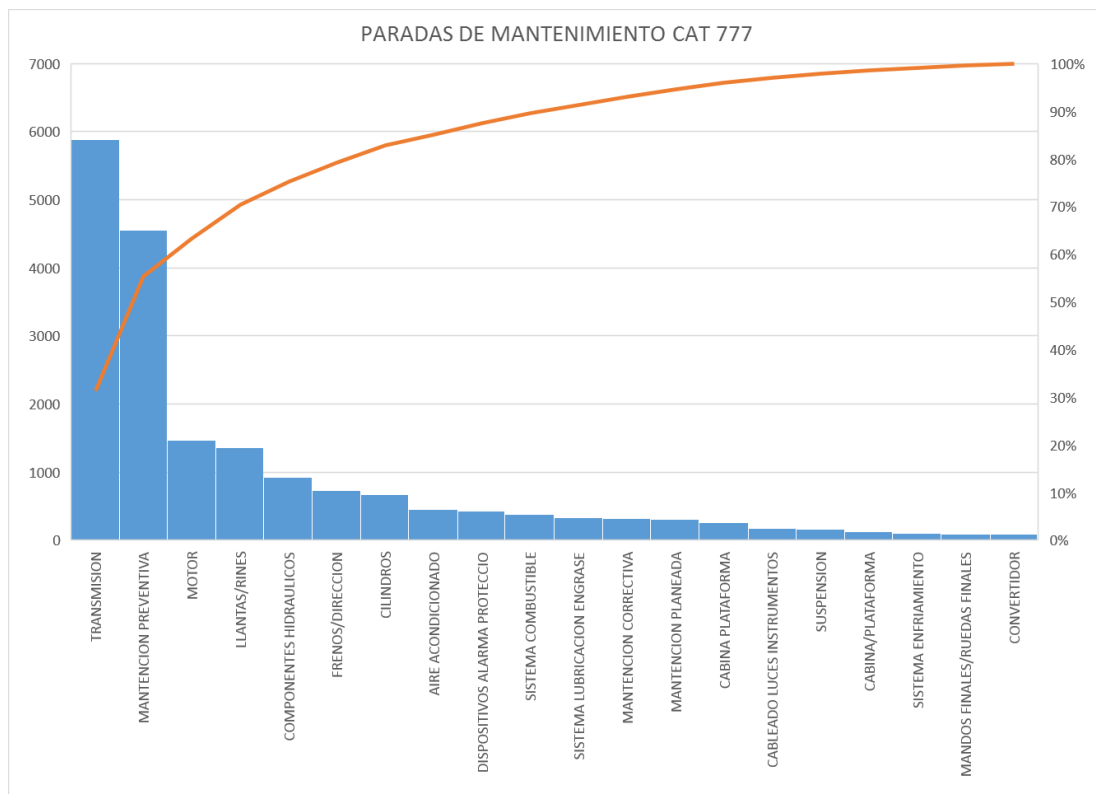
Esta flota tuvo una disponibilidad promedio en el periodo en mención de 84%, en la Figura 6, se muestra el comportamiento durante estos 12 meses, tanto para la jornada de día

como de noche, como se puede observar no hay diferencias apreciables entre la disponibilidad de noche y de día, aunque en la mayoría de los meses la disponibilidad de la noche está por encima que la del día, excepto en los períodos de verano (diciembre y enero). La mayor disponibilidad en la noche se da porque el mantenimiento preventivo, por lo general, se ejecuta en el día.

En la Figura 7 se muestran las principales paradas por mantenimiento de esta flota, la primera causa de parada es por fallas en la transmisión, seguida del mantenimiento preventivo, lo que muestra una adecuada gestión de mantenimiento de esta flota. Lo de la transmisión se explica porque en este período se cumplía el cambio de transmisión de todos los equipos de dicha flota.



*Figura 6. Disponibilidad de la Flota CAT 777 en el año financiero 2016*



*Figura 7. Pareto de Paradas de Mantenimiento de la Flota CAT 777*

### 2.1.2. Flota CAT 773

Esta flota tuvo una disponibilidad promedio de 80%, y el comportamiento en los 12 meses se muestran en la figura 8. En la figura 9 se muestran las principales paradas por mantenimiento, ocupando el primer lugar la parada por mantenimiento preventivo, seguida de paradas por transmisión. Como en la Flota CAT777, ésta también muestra una buena gestión de mantenimiento.

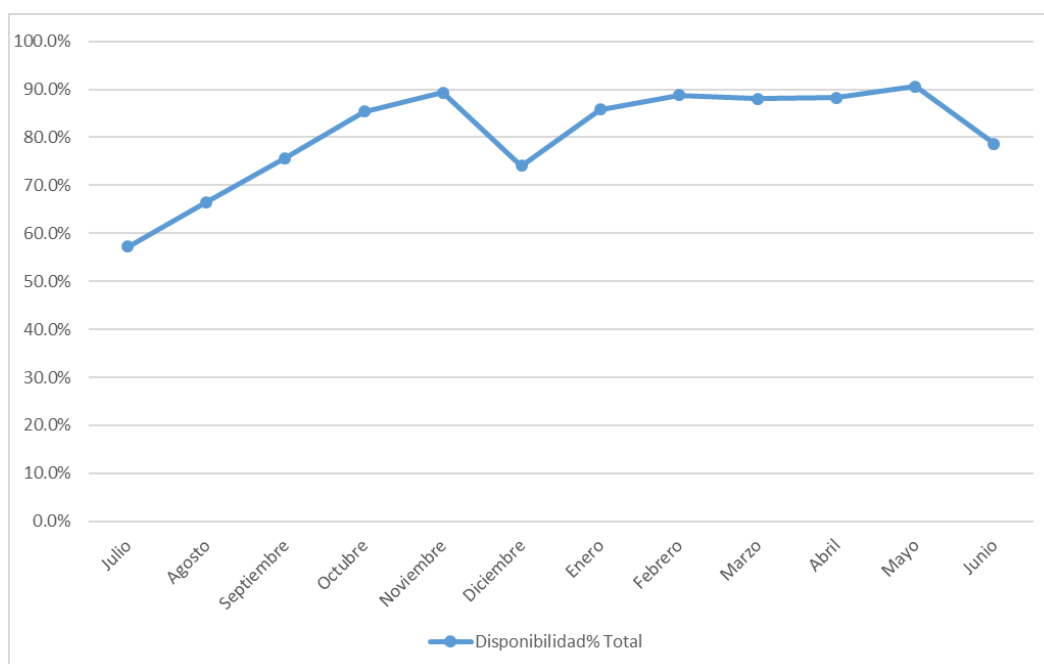


Figura 8. Disponibilidad de la Flota CAT 773 en el año financiero 2016

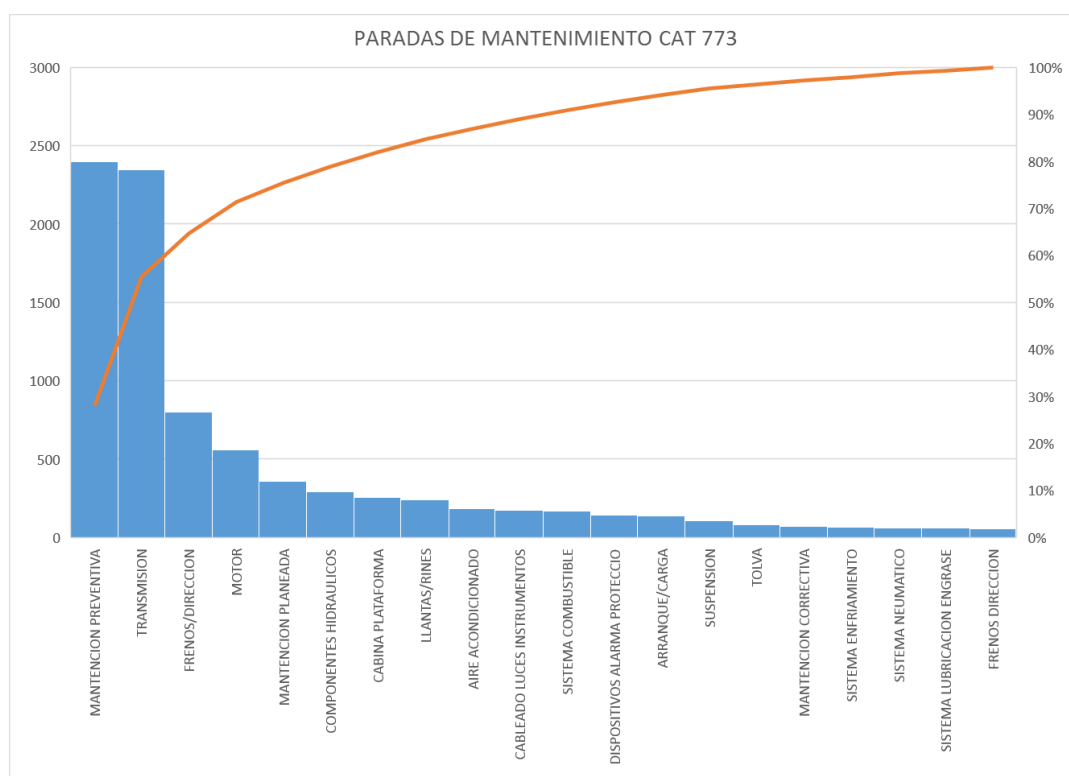


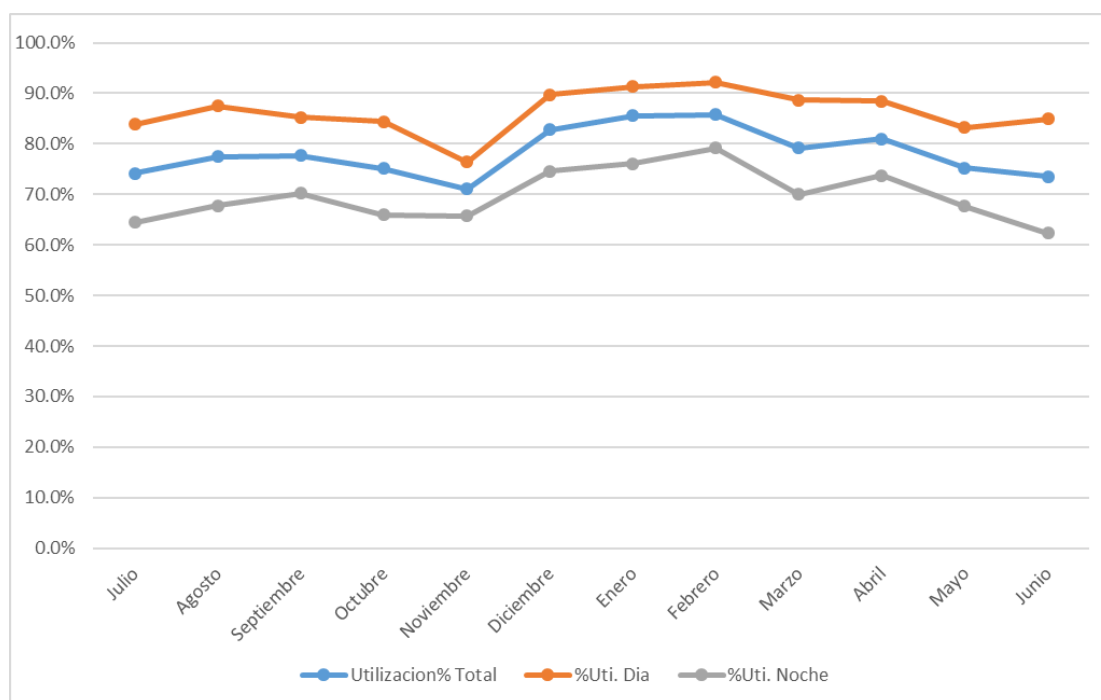
Figura 9. Pareto de Paradas de Mantenimiento de la Flota CAT 773

## 2.2. Utilización

La utilización como definida en la Ecuación (4), depende de las paradas de proceso de los equipos disponibles, las principales paradas son: cambio de turno, alimentación, servicios, lluvia, entre otros. A continuación, se presenta el desempeño en utilización de las dos flotas para el período correspondiente al año financiero 2016.

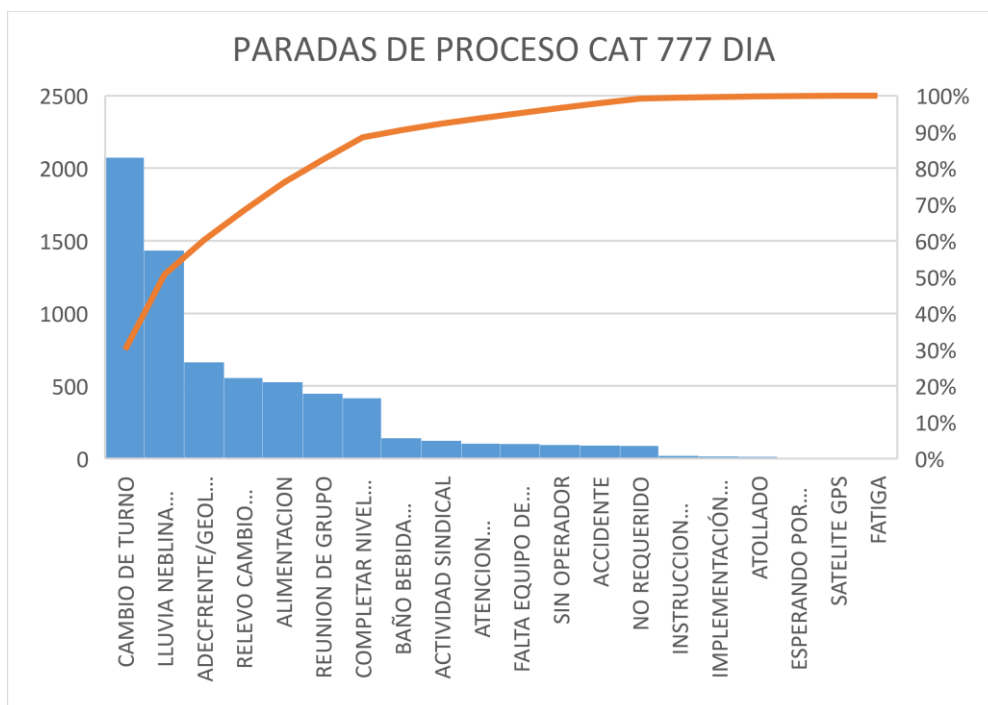
### 2.2.1. Flota CAT 777

La utilización de la flota CAT777 en el año financiero 2016 fue de 78%, en este año se comenzó operando 14 camiones y a partir de diciembre se pararon 2 camiones. En la Figura 10 se muestra el comportamiento de la utilización para todos los meses de este período, discriminando entre día y noche.

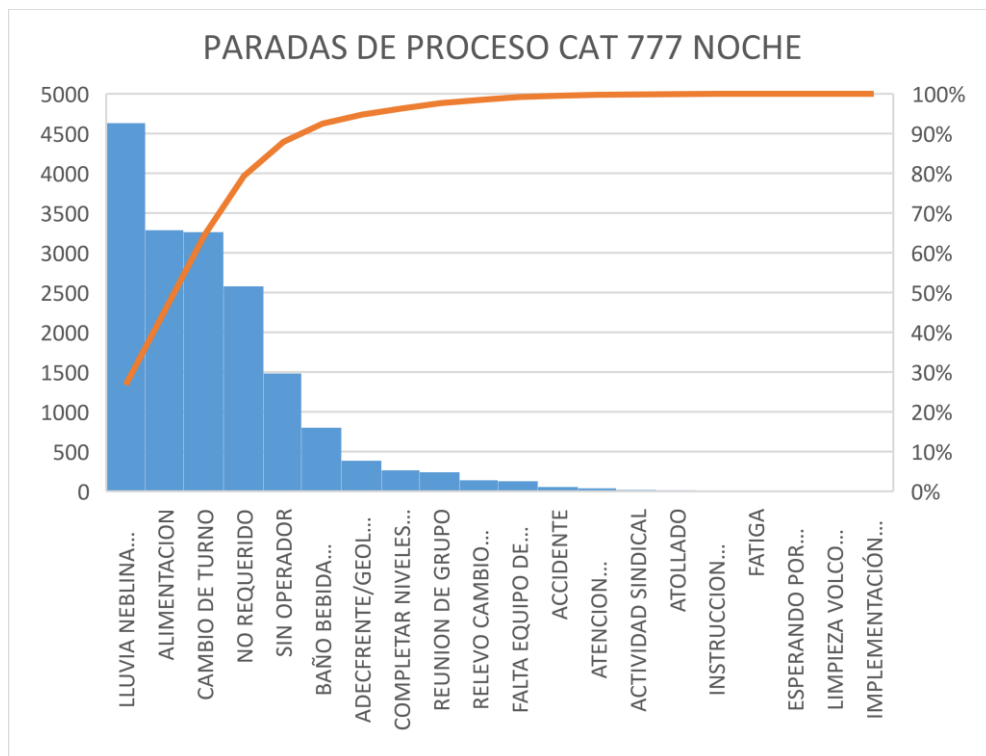


*Figura 10. Utilización de la Flota CAT 777 en el año financiero 2016*

Como se puede observar en la figura 10, existe una marcada diferencia de la utilización de la flota en el día, alrededor de 86%, y en la noche, de 70%, de acuerdo a lo mostrado en los diagramas de Pareto de parada (Figura 11 y 12), esta diferencia de 16 puntos está dada básicamente por las paradas de lluvia, en la noche las paradas por lluvia representan el 75% del total de estas paradas. Esto sugiere aplicar una estrategia de uso de los equipos diferente en el día y en la noche para optimizar la producción y los costos.



*Figura 11. Pareto de Paradas de Proceso de la Flota CAT 777 en el Día*



*Figura 12. Pareto de Paradas de Proceso de la Flota CAT 777 en la Noche*

Los tiempos de las principales paradas por turno se resumen en las Tablas 6 y 7, diferenciando los valores para los turnos de día y de noche, se puede apreciar que todas las paradas aumentan en el turno de noche.

<b>Paradas turno Día 12h</b>		
	h	min
Cambio de turno	0.36	22
Almuerzo/Comida	0.46	28
Baño/Bebida caliente	0.09	6
Servicio al equipo (Tanqueo/Inspección)	0.13	8
Otras paradas no planeadas	0.13	8
Total paradas en el turno	1.18	71
Horas Operativas en el turno (no incluye ineficiencias)	10.82	

*Tabla 6. Paradas de proceso programadas en turno de día flota CAT777*

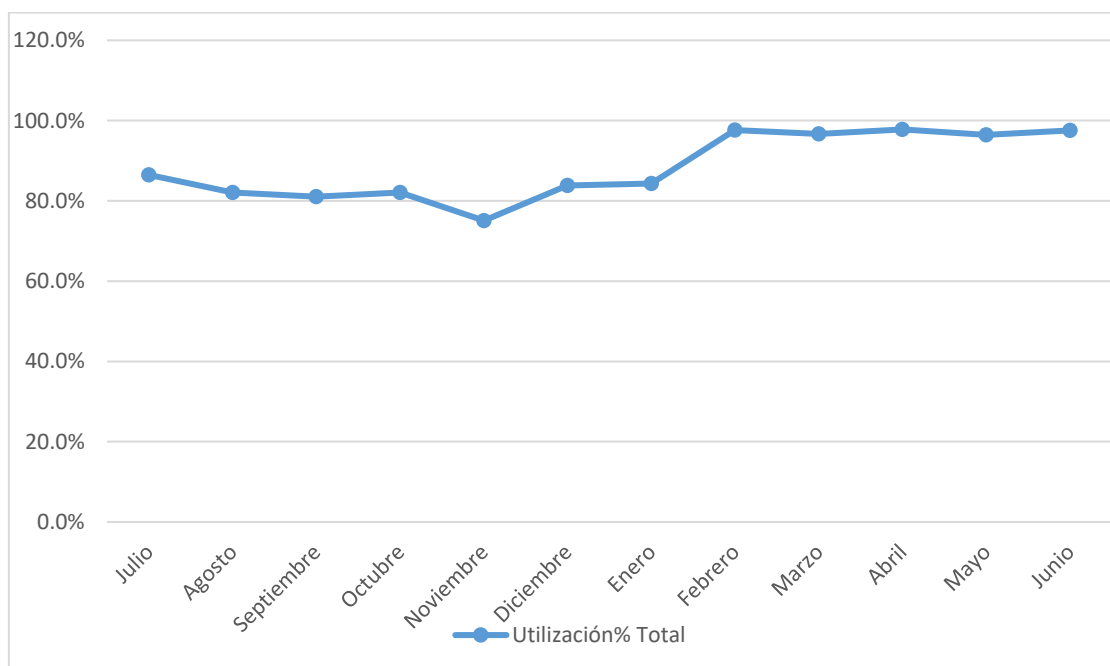
<b>Paradas turno Noche 12h</b>		
	h	min
Cambio de turno	0.42	22
Almuerzo/Comida	0.86	51
Baño/Bebida caliente	0.17	10
Servicio al equipo (Tanqueo/Inspección)	0.17	10
Otras paradas no planeadas	0.17	19
Total paradas en el turno	1.78	116
Horas operativas en el turno (no incluye ineficiencias)	10.22	

*Tabla 7. Paradas de proceso programadas en turno de Noche flota CAT777*

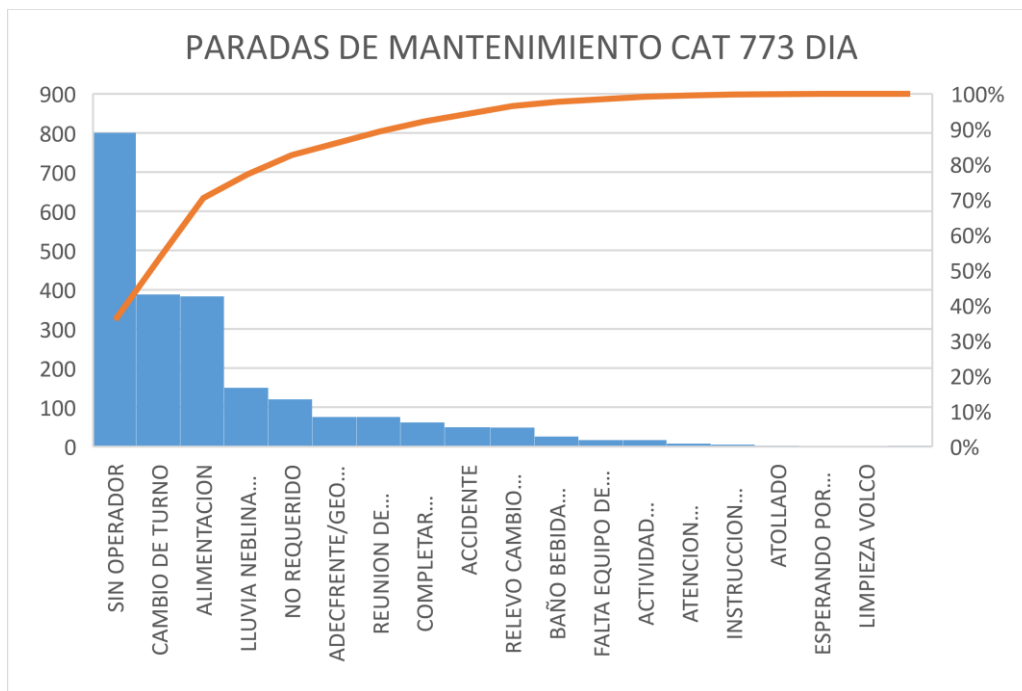


### 2.2.2. Flota CAT 773

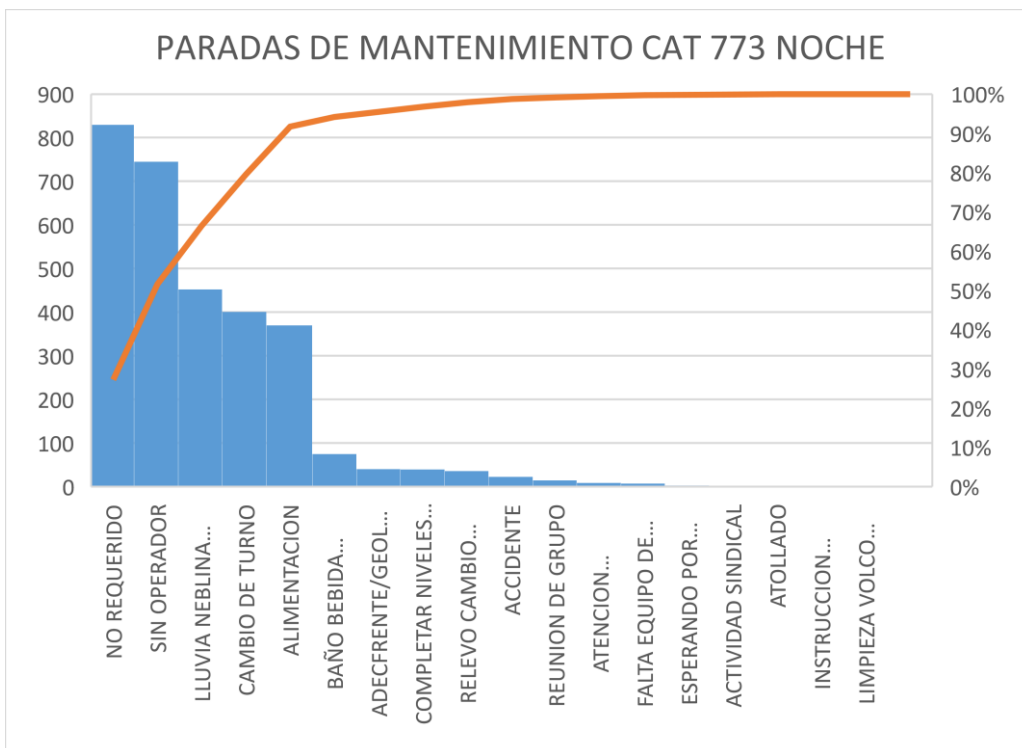
La utilización de la flota CAT773 en el año financiero 2016 fue de 78%, en este año se comenzó operando 6 camiones, 4 que operaban en la mina y 2 transportando Escoria y a partir de noviembre se fueron parando camiones hasta que en enero quedaron solo 4 camiones, que están dedicados a mover Escoria y *Upgrading*. En la Figura 13 se puede ver el desempeño de esta flota a través de todos los meses del año financiero y en las Figuras 14 y 15 los Pareto de las paradas de proceso tanto en el día como en la noche. Estos camiones tienen mayor utilización por que el flujo de material que más transportan (Escoria y *Upgrading*) es continuo, y por las condiciones de las vías para esos materiales se pueden usar en condiciones de lluvia.



*Figura 13. Utilización de la Flota CAT 773 en el año financiero 2016*



*Figura 14. Pareto de paradas de proceso de la Flota CAT 773 en el día*



*Figura 15. Pareto de Paradas de Proceso de la Flota CAT 773 en la noche.*

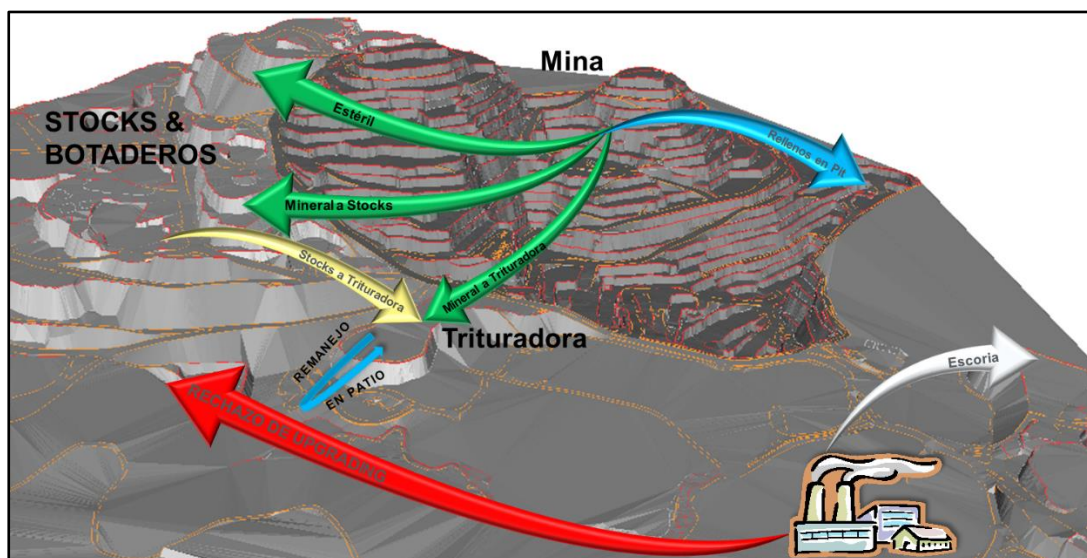
### 2.3. Productividad de la Flota de Acarreo

Como se mencionó en la Sección iv. (Marco Conceptual), la productividad de la flota de acarreo es función de cuatro factores: Tiempo de ciclo, Factores de eficiencia, Esponjamiento y densidad del material y capacidad nominal del equipo. Para el caso de CMSA en los datos del FY16, solo consideraremos los factores del tiempo de ciclo y carga nominal del equipo, debido que en los tiempos reales se encuentra implícito las eficiencias y para los cálculos de productividad en CMSA se asume que el camión siempre lleva la carga nominal.

Para el caso de los tiempos de ciclos, las corrientes de movimiento se agrupan en cuatro categorías principales:

1. Movimiento Mina: Comprende las corrientes de producción y de remanejo de material desde los stocks a trituradora. Estos movimientos son efectuados principalmente con los camiones de CAT 777 de 90 t de capacidad.
  - i. Corrientes de Producción: Son todas las que representan un movimiento desde la mina hasta los botaderos de estéril o stocks de mineral y hasta la trituradora (Corrientes en color verde en la Figura 16)
  - ii. Remanejo de Stocks a Trituradora: Es el material que se encuentra en los stocks de mineral y es llevado a la trituradora (Corriente en color amarillo en la Figura 16)
2. Movimiento de Escoria: Es el movimiento de la Escoria que sale de la planta piro-metalúrgica y es llevada hasta los botaderos de Escoria (Corriente en color gris en la figura 16). Este movimiento se hace exclusivamente con los camiones CAT 773 de 50 t.

3. Movimiento de *Upgrading*: Es el movimiento del material de rechazo de la planta de clasificación y es llevado hasta los botaderos de *Upgrading* (Corriente en color rojo en la figura 16). Este movimiento se hace exclusivamente con los camiones CAT 773 de 50 t.
4. Movimiento de Otras Actividades: Son todas aquellas actividades de remanejo de material o que no cuentan como producción (corrientes en color azul en la figura 16). Estos movimientos pueden ser: Remanejo de material dentro del patio de trituración, rellenos en Pit, remanejo entre botaderos y/o stocks, etc.



*Figura 16. Corrientes de Movimiento de Material en CMSA*

#### 2.4. Tiempos de Ciclos de Flota de Acarreo en el FY16

Los tiempos de ciclos fueron tomados de la base de datos del sistema de administración de flota de la mina (MODULAR), se recopilaron 75,771 registros de tiempos de ciclos

correspondientes al año financiero 2016. A estos registros se les tuvo que hacer filtros de limpieza de datos porque había registros con valores anómalos.

#### 2.4.1. Flota CAT 777

Para esta flota se tomaron un total de 55,131 registros, de los cuales 53,270 corresponden a la corriente de movimiento mina. Las principales variables de tiempos de ciclos para las diferentes corrientes se presentan en la Tabla 8.

La distancia promedio del ciclo para la corriente de movimiento mina, la más importante porque representa lo que es el negocio minero, es de 5.6 km, si se tiene en cuenta solo el tiempo viajando, descontando los tiempos del camión parado, se estima que los camiones van a una velocidad media de 23.2 Km/h para esta corriente.

Corriente	Cargue (min)	Ida - Viajando Cargado (min)	Maniobras en Botaderos (min)	Vuelta - Viajando Vacío (min)	Espera y Posicionamiento (min)	Total Ciclo (min)	Productividad (t/h)
<b>Movimiento Mina</b>	<b>2.9</b>	<b>7.2</b>	<b>1.3</b>	<b>7.3</b>	<b>1.8</b>	<b>20.5</b>	<b>264</b>
Mineral a Trituradora	3.0	6.0	0.8	6.9	2.0	18.6	290
Mineral a Stock	2.9	8.0	1.5	7.6	1.7	21.8	249
Estéril	2.9	7.5	1.4	7.3	1.7	20.8	260
<b>Otras Actividades</b>	<b>3.0</b>	<b>4.8</b>	<b>1.0</b>	<b>5.6</b>	<b>1.6</b>	<b>16.0</b>	<b>338</b>

*Tabla 8. Tiempos de ciclo para flota CAT777*

En el Anexo 1 se presentan todas las estadísticas para las variables de tiempo de ciclo para esta flota.

### 2.4.2. Flota CAT 773

Para esta flota se tomaron 5,792 registros, la mayor cantidad corresponde a la corriente de movimiento mina con 3,167 registros. En la actualidad esta flota se utiliza casi exclusivamente para el movimiento de Escoria y *Upgrading* (rechazo de la planta de clasificación). Las principales variables de tiempos de ciclos para las diferentes corrientes se presentan en la Tabla 9.

La distancia promedio del ciclo para la corriente de movimiento mina, para esta flota, es de 4.8 km, si se tiene en cuenta solo el tiempo viajando, descontando los tiempos del camión parado, se estima que esta flota viaja a una velocidad media de 22.6 Km/h para esta corriente.

Corriente	Cargue (min)	Ida - Viajando Cargado (min)	Maniobras en Botaderos (min)	Vuelta - Viajando Vacío (min)	Espera y Posicionamiento (min)	Total Ciclo (min)	Productividad (t/h)
<b>Movimiento Mina</b>	<b>1.9</b>	<b>5.9</b>	<b>1.2</b>	<b>6.7</b>	<b>1.2</b>	<b>16.9</b>	<b>182</b>
Mineral a Trituradora	2.0	7.4	1.5	6.2	0.8	17.9	172
Mineral a Stock	2.1	7.4	1.5	8.1	1.4	20.5	150
Estéril	2.0	7.2	1.5	7.6	1.4	19.6	157
Escoria	<b>0.4</b>	<b>1.1</b>	<b>0.2</b>	<b>6.7</b>	<b>0.1</b>	<b>8.4</b>	<b>365</b>
Upgrading	<b>1.2</b>	<b>5.2</b>	<b>1.5</b>	<b>24.9</b>	<b>0.7</b>	<b>33.5</b>	<b>92</b>
<b>Otras Actividades</b>	<b>1.6</b>	<b>3.0</b>	<b>0.9</b>	<b>5.1</b>	<b>0.9</b>	<b>11.4</b>	<b>270</b>

*Tabla 9. Tiempos de ciclo para flota CAT773*

### 3. Modelo de Estimación de Costos de Acarreo

En esta sección se describen los costos operativos de la flota de acarreo, el modelo de estimación de estos costos a menudo se presenta en función de las horas de operación de la flota, y básicamente son de tres tipos: costos de consumo de combustibles, mano de obra y de mantenimiento. Los costos de capital representan la compra y/o los componentes mayores, se asume que el modelo es para estimación de un año sin compra de nuevos equipos, los costos de capital representarán los costos de los componentes mayores y se estimarán como un porcentaje del valor de los camiones.

#### 3.1. Costos de Combustibles

Para estimar el costo de combustible por hora se usa el consumo específico de los equipos multiplicado por el precio local del combustible. El consumo específico depende de las condiciones de operación de los equipos, estado de las vías, material transportado, y de la eficiencia del operador, esto es lo que se denomina el factor de carga de la flota (Caterpillar 2016). Para este caso se analizaron datos recopilados en la Unidad de Negocios Mina de Cerro Matoso de los meses de octubre de 2015 a mayo 2016, con los que se puede concluir que el consumo específico de combustible para la flota CAT 773 está en el orden del factor de carga bajo y el de la flota CAT 777 es medio de acuerdo al “Manual de Rendimiento de Maquinaria Pesada de Caterpillar” y que es mostrado en la Tabla 10.

<b>Camiones de Minería y Obras</b>						
	<b>Bajo</b>		<b>Medio</b>		<b>Alto</b>	
Model	litro	U.S. gal	litro	U.S. gal	litro	U.S. gal
773E	27.4-41.2	7.2-10.9	41.2-54.9	10.9-14.5	54.9-68.6	14.5-18.1
777G5	37.5-56.2	9.9-14.8	56.2-75.0	14.8-19.8	75.0-93.7	19.8-24.8

*Tabla 10. Consumo específico de combustible por tipo de flota*

*Tomado de Caterpillar Performance Handbook Ed 46 pág. 25-27*

### 3.2. Costos de Mantenimiento

Para la estimación de estos costos de mantenimiento por hora operada en una operación minera se puede estimar, para un período específico, dividiendo los costos totales de mantenimiento (OPEX, sin incluir mano de obra) para cada flota entre las horas operativas totales de dicha flota para el período específico. Para el caso de este estudio se analizaron los datos del año financiero 2016, en la Tabla 11 se presenta los datos en términos de porcentaje teniendo como línea base los costos de la flota CAT 777 que es la de mayor número de equipos.

<b>Flota</b>	<b>%</b>
CAT 777	100%
CAT 773	80%

*Tabla 11. Costos de mantenimiento por tipo de flota en porcentaje*



### 3.3. Costos de Mano de Obra

En los costos de mano de obra se tiene en cuenta los operadores de los camiones en función de los camiones disponible y la configuración de rotación de turnos y una estimación del número de mantenedores igual al 40% del número de operadores, que se ha usado anteriormente en CMSA (Cerro Matoso S.A. 2012), para efectos de cálculos se asume un salario promedio similar para todos los operadores, pero de acuerdo a la rotación en que se encuentran van a recibir más o menos recargos nocturnos. Se consideran dos rotaciones una de 2x2x4 (dos turnos de 12 horas de día, dos turnos de 12 horas de noche y 4 días de descanso) y otra de 4x4 (cuatro turnos de 12 horas de día y cuatro días de descanso), la diferencia entre uno y otro turno es de 14% aproximadamente en recargos nocturnos, para el caso de mantenedores se asume que solo rotan 2x2x4. En la Tabla 12 se muestra la diferencia en número de horas de recargo nocturno entre las distintas rotaciones.

<b>Rotación</b>	<b>Recargo Nocturno (h)</b>
2x2x4	22
4x4	4

*Tabla 12. Recargo nocturno para los diferentes turnos*

#### 4. Modelo de Optimización

En el modelo se definen los elementos de optimización, que son: las variables de decisión, los coeficientes, la función objetivo y las restricciones, los cuales describiremos en las secciones siguientes. Para efectos de elaboración del modelo, sólo se hará sobre los costos generados para las corrientes de movimiento mina (Mineral a Patio, Mineral a Stock, Estéril y Remanejo de stocks) y Otras actividades (Remanejo en patio, rellenos, ect), los movimientos de Escoria y *Upgrading* no se considerarán en el modelo porque su flujo es continuo y tienen camiones exclusivos.

##### 4.1. Definición de Variables

Las variables de decisión son las que usualmente definen la cantidad de recursos, en nuestro caso son las horas requeridas de operación de camiones para cada movimiento de material, y cuantos operadores de camión son necesarios para lograr estas horas.

- **Número de Horas Requeridas:** En función de los Camiones disponibles y la Productividad de Camiones.
- **Número de Operadores Requeridos:** En función de los Camiones disponibles y el esquema de rotación de turnos.

Los coeficientes son aquellas constantes, o se asumen que son constantes, que multiplican las variables de decisión, en nuestro modelo son los siguientes:

- Costos de combustibles por hora de cada flota (CAT 777 y CAT 773)

- Costos de mantenimiento por hora operada de cada flota (CAT 777 y CAT 773)
- Salario mensual de los operadores de camión

Para construir el modelo definimos las siguientes variables:

$C_i^C$  = Costos de combustibles para la flota  $i$

Dónde ,  $i = 1,2$

1 = Flota CAT 777

2 = Flota CAT 773

$C_i^M$  = Costos de mantenimiento para la flota  $i$

$X_{ijt}$  = Horas de operación para la flota  $i$  en la actividad  $j$  en el periodo  $t$

Dónde ,  $j = 1,2$

1 = Movimiento Mina

2 = Otras Actividades

Dónde ,  $t = 1,2,3 \dots 12$ , meses del año financiero, 1 = Julio y 12 = junio

$C_l^S$  = Costos de salarios para el turno  $l$

Dónde ,  $l = 1,2$

1 = turno con rotación 4x4

2 = turno con rotación 2x2x4

$W_{lt}$  = Número de operadores para el turno  $l$  para el periodo  $t$

$C_i^K$  = Costos de capital para la flota  $i$

$P_{jt}$  = Producción de la actividad  $j$  en el periodo  $t$

$Q_{ijt}$  = Tasa de producción por hora de la flota  $i$  en la actividad  $j$  en el periodo  $t$

$Y_{lt}$  = Número de horas calendario para el turno  $l$  en el periodo  $t$

$U_{ilt}$  = Utilización de la flota  $i$  en el turno  $l$  en el periodo  $t$

$N_{ijlt}$  = Camiones disponibles de la flota  $i$  para la actividad  $j$  en el turno  $l$  en el periodo  $t$

$G_l$  = Número de grupos para el turno  $l$

$I_{jt}$  = Inventario de la actividad  $j$  en el periodo  $t$

$F_{jt}$  = Faltante de la actividad  $j$  en el periodo  $t$

$PR_{jt}$  = Producción real de la actividad  $j$  en el periodo  $t$

#### 4.2. Función Objetivo

El objetivo de este modelo es minimizar los costos de la flota de acarreo mencionados en las secciones anteriores y que se describe según la Ecuación 7.

$$CT_{(min)} = \sum_t \left( \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 C_i^C X_{ijt} + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 C_i^M X_{ijt} + 1.4 \sum_{l=1}^2 C_l^S W_{lt} + \sum_{i=1}^2 C_i^K \right) \quad (7)$$

La cual se puede contraer aún más como aparece en la Ecuación 8.

$$CT_{(min)} = \sum_t \left( \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 X_{ijt} (C_i^C + C_i^M) + 1.4 \sum_{l=1}^2 C_l^S W_{lt} + \sum_{i=1}^2 C_i^K \right) \quad (8)$$

#### 4.3. Restricciones

Las restricciones son claves en un modelo de optimización, estas reflejan los límites del mundo real, en este modelo corresponden a la producción requerida para cada corriente, horas operadas por flota, número de camiones y de operadores.

#### 4.3.1. Producción

Estas son las restricciones para cumplir la producción planeada y/o requerida y están dadas por las siguientes ecuaciones.

$$\text{Producción} = \text{Tasa de producción por camión por Hora} \times \text{Horas Requeridas} \quad (9)$$

$$P_{jt} - Q_{ijt} X_{ijt} \leq 0, \forall_{ijt} \quad (10)$$

#### 4.3.2. Horas Requeridas

Restricción para garantizar que las horas de operación no se sobrepasen las horas calendarios.

$$\text{Horas Requeridas} \leq (\text{Horas Calendario} \times \text{Utilización}) \times \text{Número de Camiones Disponibles} \quad (11)$$

$$X_{ijt} - \sum_{l=1}^2 Y_{lt} U_{ilt} N_{ijlt} \leq 0, \forall_{ijlt} \quad (12)$$

#### 4.3.3. Número de Operadores

$$\text{Número de Operadores} \geq \text{Número de camiones Disponibles} \times \text{Número de Turnos} \quad (13)$$

$$W_{lt} - (N_{ij(l+1)t} - N_{ijlt}) \times G_l \geq 0, \forall_{ijt, l=1} \quad (14)$$

$$W_{lt} - \left( \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 N_{ijlt} \right) \times G_l \geq 0, \forall_{ijt, l=2} \quad (15)$$

$$W_{lt} \geq 0, \in \text{Entero}, \forall_{l,t} \quad (16)$$

## 4.3.4. Número de Camiones

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^2 N_{ijlt} \leq 14, \forall_{jlt, i=1} \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^2 N_{ijlt} \leq 3, \forall_{jlt, i=2} \quad (18)$$

## 4.3.5. Balance de Inventario:

$$I_{jt} - F_{jt} = I_{jt-1} - F_{jt-1} + PR_{jt}, \forall_{jt} \quad (19)$$

$$PR_{jt} - I_{jt} + I_{jt-1} + F_{jt} - F_{jt-1} = P_{jt}, \forall_{jt} \quad (20)$$

## 4.3.6. Restricciones de Inventario

$$I_{j0} = 0 \quad (21)$$

$$I_{1t} \leq P_{1t} \times 10\%, \forall_t \quad (22)$$

$$I_{2t} = 0, \forall_t \quad (23)$$

## 4.3.7. Restricción de Faltantes

$$F_{jt} = 0, \quad \forall_{jt} \quad (24)$$

## 5. Elección del Método y Herramienta de Solución del Problema

En esta sección se presenta el método y la herramienta utilizada para resolver el problema de optimización para minimizar los costos de la flota de acarreo de CMSA.

El modelo teórico presentado en el capítulo anterior se puede resolver con métodos de programación lineal (PL), pero como tiene algunas restricciones de valores enteros se dice que es un problema de programación de entera mixta (MIP), que es un poco más difícil de resolver que los de PL, hay varios métodos de solución para este tipo de problemas, algunos conocidos son: Branch and Bound; Cutting Planes; Branch and Cut y Meta heurísticos (Franco & Otros 2012).

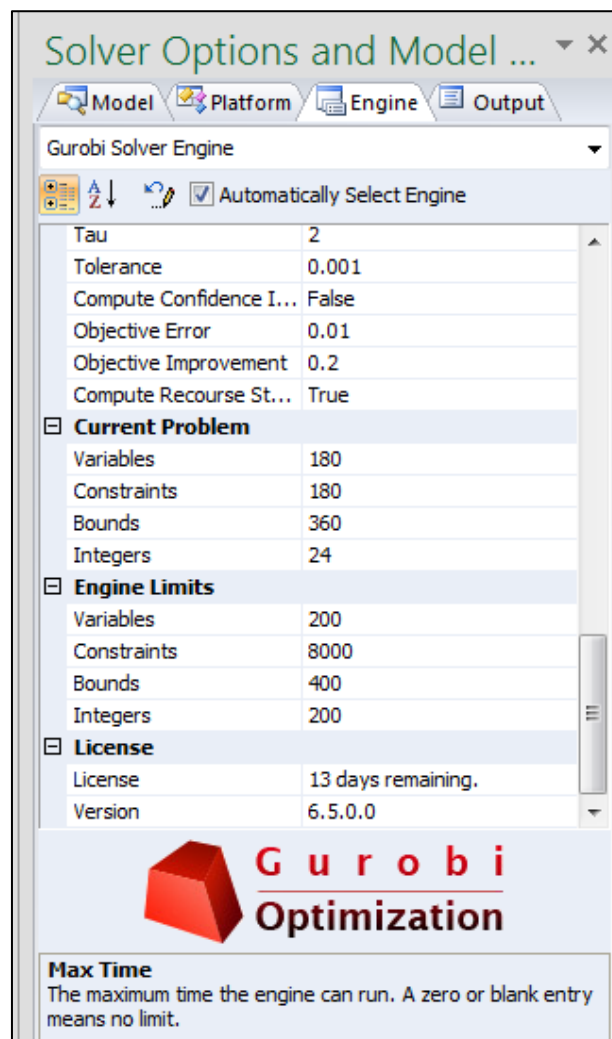
En la Tabla 13, se muestra el tamaño del modelo a resolver, éste tamaño es demasiado grande para resolverlo con el complemento Solver de Microsoft Excel, ya que éste está limitado a 200 variables y 100 restricciones. Por esta razón se escogió la herramienta Solver Premium de FrontlineSolvers

	<b>Variables</b>	<b>Restricciones</b>	<b>Límites</b>	<b>Enteros</b>
#	180	180	360	24

*Tabla 13. Tamaño del Modelo de Optimización*

Solver Premium tiene varios motores de optimización capaces de resolver este tipo de problemas con este número de variables y restricciones. Para este caso el motor de optimización usado fue el Gurobi Solver Engine, que es el recomendado por Solver Premium al correr el modelo (ver Figura 20) y de acuerdo a la guía de usuario (User Guide) de FrontlineSolvers, es uno de los motores más poderosos para resolver este tipo de problemas de LP/MIP, que usa

algoritmos duales de Simplex y Barrier, combinado con métodos de vanguardia de Branch and Cut para resolver problemas enteros y produce soluciones en tiempos muy cortos, en el caso de nuestro problema, entrega una solución en 21 segundos aproximadamente. En las siguientes figuras se muestra el proceso de optimización con Solver Premium.



*Figura 17. Límites del Gurobi Solver Engine*



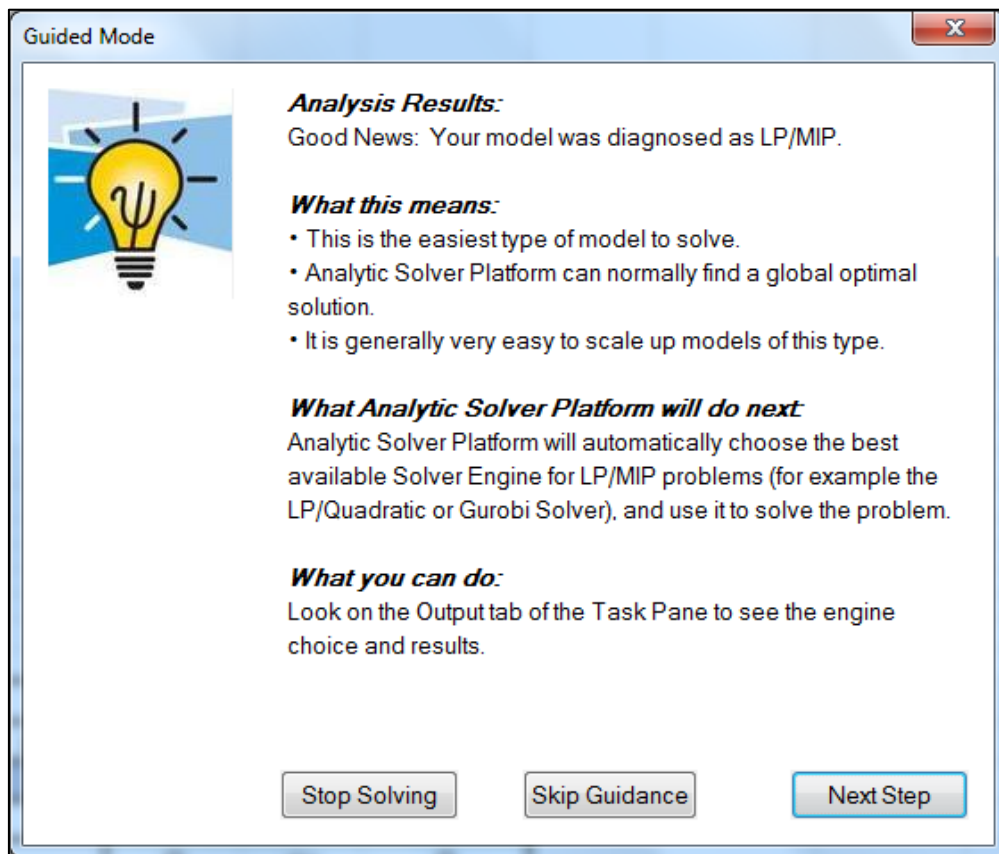


Figura 18. Pantalla de análisis del modelo

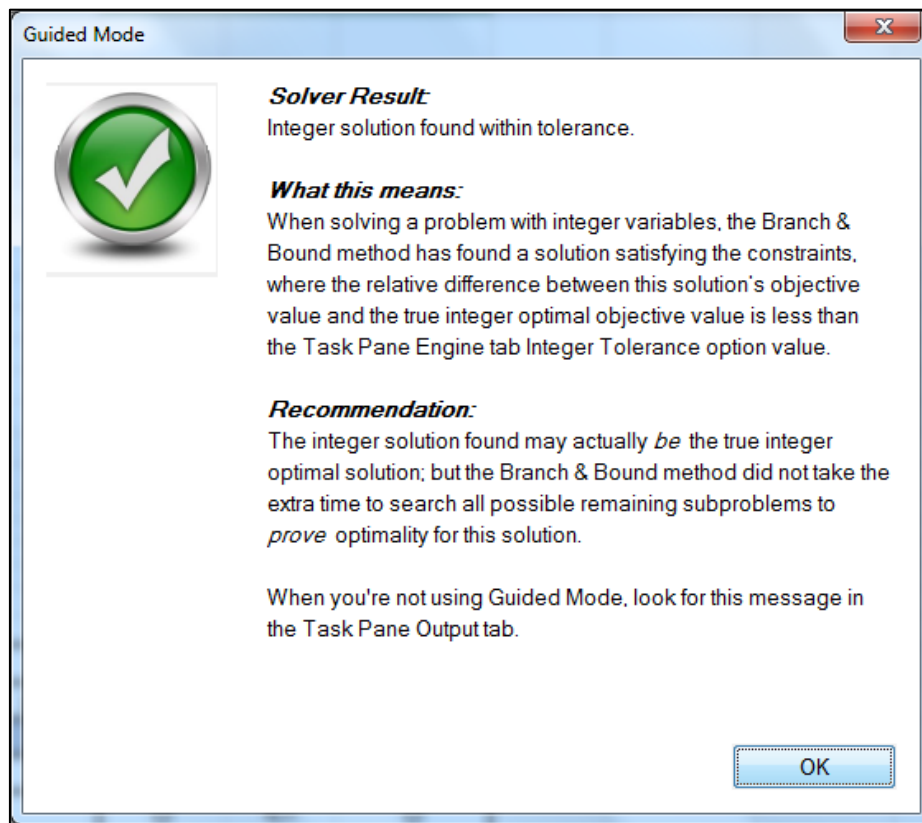


Figura 19. Pantalla de resultados

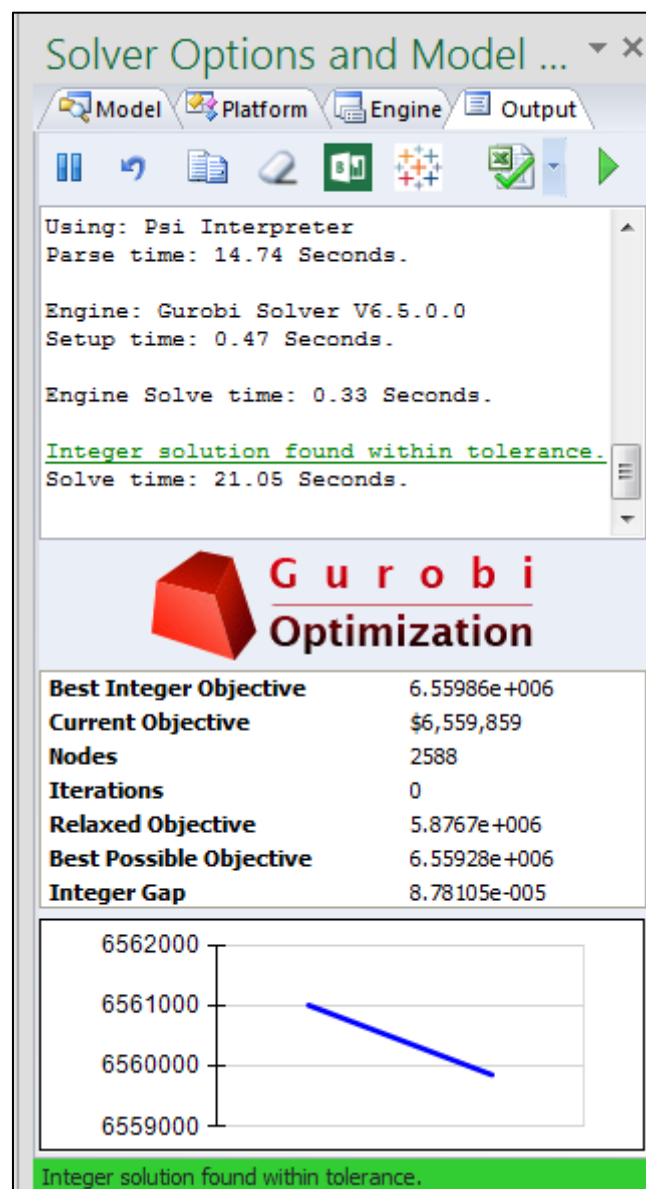


Figura 20. Evidencia de solución en Solver Premium

```
---- Start Solve ----  
No uncertain input cells.  
Using: Full Reparse.  
Parsing started...  
Diagnosis started...  
Convexity testing started...  
Warning: Canceled diagnostics *0 at 'Model FY16 Opt Productividad'!FZ168; 32092  
Canceled diagnostics found.  
Model diagnosed as "LP/MIP".  
Automatic engine selection: Gurobi Solver V6.5.0.0  
Model: [Reporte Modelo.xlsx]Model FY16 Opt Productividad  
Using: Psi Interpreter  
Parse time: 15.07 Seconds.  
  
Engine: Gurobi Solver V6.5.0.0  
Setup time: 0.44 Seconds.  
  
Engine Solve time: 0.41 Seconds.  
  
Integer solution found within tolerance.  
Solve time: 24.26 Seconds.
```

*Figura 21. Reporte de lo ocurrido durante el proceso de optimización*

## 6. RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos con el modelo descrito en las secciones anteriores y cuáles son los ahorros que se pueden lograr. Esta optimización fue corrida para los años financiero 2016, el cual usa datos reales para comprobar el modelo, 2017, año en curso y en el cual ya se han implementado algunas mejoras propuestas en este estudio, y lo planeado para los años 2018 y 2019. Se termina con una sensibilización de las principales variables que impactan en los resultados de ahorro de la flota de acarreo.

### 6.1. Año Financiero 2016

Para este año se usan todos los datos recolectados y que fueron mostrados en la Sección 2. “Desempeño de la Flota de Acarreo de CMSA en el Año Financiero 2016” y con los cuales se configura el modelo para estimar los costos de la flota de acarreo de una forma adecuada.

#### 6.1.1. Datos de entrada

Los datos de entrada son de dos tipos: financieros y operativos. Los financieros se refieren a los costos de la operación tales como salarios, costos de combustibles, de mantenimiento y CAPEX, estos son mostrados en la Tabla 14 en forma de porcentajes, considerando la línea base (100%) los costos para la flota CAT 777 y el turno 2x2x4. Los datos operativos se refieren a los movimientos de las corrientes (Movimiento Mina y Otras Actividades), las productividades para dichos movimientos, horas operativas (horas calendarios x Utilización) tanto de día como de noche, importante esto porque las paradas operativas son diferentes en el día que en la noche. Estos son mostrados en la Tabla 15.

<b>Datos Financieros</b>	<b>Valor (%)</b>
Salario Trabajador 4x4 por mes	86%
Salario Trabajador 2x2x4 por mes	100%
Costo ACPM CAT777 por hora	100%
Costo ACPM CAT773 por hora	52%
Costo Mantenimiento CAT777 por hora	100%
Costo Mantenimiento CAT773 por hora	80%
Costo CAPEX CAT777 (000 USD) por año	100%
Costo CAPEX CAT773 (000 USD) por año	39%

*Tabla 14. Datos financieros de entrada FY2016*

#### 6.1.2. Estimación de Costos sin Optimizar

Para la estimación de costos se necesita estimar las horas requeridas para alcanzar los movimientos planeados, con esto se estima los números de camiones disponibles y con este dato se calcula el número de operadores requerido. Para el año financiero 2016 se usan los datos reportados por la Unidad de Mina y se muestran en la Tabla 16, con los cuales se hacen las estimaciones de distribución de costos, mostrados en la Tabla 17, aquí se presentan en términos de porcentaje y serán usados como línea base para las siguientes estimaciones.

	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Movimiento Mina (kt)	1,718	1,892	1,858	2,010	1,464	1,568	1,492	1,518	1,636	1,538	1,347	1,357
Otras Actividades (kt)	95	93	97	109	75	84	79	81	94	89	75	77
Productividad Mov. Mina CAT777 (t/h)	271	272	277	274	257	273	256	258	273	267	251	274
Productividad CAT 777 Otras Actividades (t/h)	349	333	316	322	339	302	372	462	491	503	438	332
Productividad CAT 773 Otras Actividades (t/h)	371	400	382	362	330	337	333	335	371	235	292	173
Horas Calendario x Utilización (Día CAT 777)	318	325	312	317	304	335	335	303	335	316	315	311
Horas Calendario x Utilización (Noche CAT 777)	251	261	267	261	266	305	313	285	316	292	269	246
Horas Calendario x Utilización (24h)	569	585	579	578	569	640	648	588	651	608	584	557

Tabla 15. Datos operativos de entrada FY2016

	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
# CAT 777 Disponibles para Mov Mina Dia	11.5	11.5	11.7	12.2	11.0	10.3	11.2	10.5	10.4	10.6	9.7	9.6
# CAT 777 Disponibles para Mov Mina Noche	11.5	11.5	11.7	12.2	11.0	10.3	11.2	10.5	10.4	10.6	9.7	9.6
# CAT 777 Disponibles para Otras Actividades 24 hr	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4
# CAT 773 Disponibles para Otras Actividades 24 hr	0.4	1.3	0.9	1.9	0.7	0.4	0.4					
Horas requeridas CAT 777 Mov Mina	6,352	6,660	6,541	6,874	5,612	5,749	5,825	5,892	5,995	5,755	5,367	4,948
Horas requeridas CAT 777 Otras Actividades	47	0	0	0	0	15	0	175	191	178	172	232
Horas requeridas CAT 773 Otras Actividades	213	719	496	1,024	368	235	238	0	0	0	0	0
Número Operadores Turnos 4x4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número Operadores Turnos 2x2x4	48	52	52	60	48	44	48	44	44	44	44	44

Tabla 16. Resultados sin optimizar – Reales del FY2016

<b>Tipo de Costos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
<b>Combustible</b>	%	35%
<b>Mantenimiento</b>	%	26%
<b>Mano de Obra</b>	%	31%
<b>CAPEX</b>	%	8%
<b>Total</b>	%	100%

*Tabla 17. Estimación de costos del modelo sin optimizar FY2016-Línea Base*

La estimación de los costos se presenta solo para el Movimiento Mina y Otras Actividades, se excluye los costos de mover Escoria y *Upgrading* ya que el modelo no los considera. En esta distribución tienen un peso importante el combustible y la mano de obra.

### 6.1.3. Estimación de Costos Optimizados

Para estimar los costos optimizados, se corre el modelo en Solver Premium, dando como resultado un ahorro del 6%, esto se muestra en la Tabla 18. Las variables operativas que hay que ejecutar para materializar el ahorro se muestran en la Tabla 19.

<b>Tipo de Costos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor Optimizado</b>	<b>%Ahorro</b>
<b>Combustible</b>	%	35%	0%
<b>Mantenimiento</b>	%	26%	0%
<b>Mano de Obra</b>	%	25%	6%
<b>CAPEX</b>	%	8%	0%
<b>Total</b>	%	94%	6%

*Tabla 18. Estimación de costos del modelo Optimizado FY2016*



	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Movimiento Mina (kt)	1,844	1,882	1,928	1,901	1,386	1,725	1,482	1,384	1,762	1,551	1,222	1,330
Otras Actividades (kt)	95	93	97	109	75	84	79	81	94	89	75	77
# CAT 777 Disponibles para Mov Mina Dia	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	11.9	12.0	12.0	11.9	11.7	12.0	11.6
# CAT 777 Disponibles para Mov Mina Noche	12.0	11.6	12.0	12.0	6.6	7.6	5.6	6.1	7.9	7.2	4.1	5.1
# CAT 777 Disponibles para Otras Actividades 24 h	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.4
# CAT 773 Disponibles para Otras Actividades 24 h	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.0	0.4	0.0
Horas requeridas CAT 777 Mov Mina	6,818	6,923	6,949	6,929	5,394	6,324	5,787	5,370	6,458	5,805	4,868	4,849
Horas requeridas CAT 777 Otras Actividades	0	0	0	0	0	0	0	0	5	178	0	232
Horas requeridas CAT 773 Otras Actividades	257	232	255	302	229	249	238	241	245	0	258	0
Número Operadores Turnos 4x4	0	1	0	0	11	9	13	12	8	9	16	13
Número Operadores Turnos 2x2x4	50	48	50	50	28	32	24	26	33	30	18	22

Tabla 19. Resultados de la optimización – Variables operativas FY2016

De acuerdo a los resultados de la optimización se observa que los ahorros están en la mano de obra, primero en el ahorro de recargos nocturnos y luego en el número total de operadores para la flota de acarreo. En el caso sin optimizar se considera rotaciones solo 2x2x4, lo que necesita 48 operadores de camión en promedio, en el caso optimizado solo necesita 42 operadores con solo 34 rotando 2x2x4 y los ocho restantes en rotación 4x4, sin recargos nocturnos.

Los costos de combustibles y mantenimiento son similares al caso sin optimizar, debido a que las horas requeridas son similares para poder cumplir con el plan de producción, ya que la productividad de los camiones no se cambia.

## 6.2. Año Financiero 2017

Para este ejercicio se consideran los mismos costos financieros que en el FY2016 y mostrados en la Tabla 14.

### 6.2.1. Datos de entrada

Los datos operativos de entrada son los planeados para cumplir con los requerimientos de producción para el FY2017 y son mostrados en Tabla 20.

### 6.2.2. Estimación de Costos sin Optimizar

Para el año financiero 2017 se usan los datos planeados en número de camiones y operadores, tanto en el turno de día como en la noche y se muestran en la Tabla 21, con los cuales se hacen las estimaciones de costos, mostrados en la Tabla 22.

	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
<b>Movimiento Mina (kt)</b>	1,413	1,301	1,322	1,406	1,389	1,535	1,062	1,234	995	1,434	1,507	1,567
<b>Otras Actividades (kt)</b>	184	176	174	188	181	187	123	168	160	200	225	515
<b>Productividad Mov. Mina CAT777 (t/h)</b>	243	245	247	241	243	242	250	244	245	246	243	243
<b>Productividad CAT 777 Otras Actividades (t/h)</b>	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362
<b>Productividad CAT 773 Otras Actividades (t/h)</b>	241	241	241	241	241	241	241	241	241	241	241	241
<b>Horas Calendario x Utilización (Dia CAT 777)</b>	303	293	287	303	297	318	326	292	315	302	300	289
<b>Horas Calendario x Utilización (Noche CAT 777)</b>	250	226	227	250	251	285	303	268	277	261	242	232
<b>Horas Calendario x Utilización (24h)</b>	553	519	515	554	549	603	628	560	592	563	541	521

Tabla 20. Datos operativos de entrada FY2017

	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
<b># CAT 777 Disponibles para Mov Mina Dia</b>	11.4	11.1	11.4	11.4	11.4	11.3	7.6	10.1	8.8	12.6	13.6	12.6
<b># CAT 777 Disponibles para Mov Mina Noche</b>	9.1	8.7	8.7	9.1	8.9	9.1	5.4	7.3	4.3	6.2	7.2	10.4
<b># CAT 777 Disponibles para Otras Actividades 24 hr</b>												
<b># CAT 773 Disponibles para Otras Actividades 24 hr</b>	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	1.8	1.7	2.1	1.9	2.2	2.4	4.3
<b>Horas requeridas CAT 777 Mov Mina</b>	5,826	5,310	5,355	5,843	5,710	6,297	4,189	4,996	4,011	5,520	5,895	6,142
<b>Horas requeridas CAT 777 Otras Actividades</b>												
<b>Horas requeridas CAT 773 Otras Actividades</b>	1,134	1,104	1,105	1,156	1,130	1,153	1,061	1,221	1,200	1,310	1,376	2,374
<b>Número Operadores Turnos 4x4</b>	5	5	6	5	5	5	5	6	10	13	13	5
<b>Número Operadores Turnos 2x2x4</b>	45	43	43	45	44	44	29	38	25	34	39	59

Tabla 21. Resultados sin optimizar – Planeados para el FY2017

<b>Tipo de Costos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor Sin Optimizar</b>	<b>%Ahorro con LB</b>
<b>Combustible</b>	%	35%	1%
<b>Mantenimiento</b>	%	27%	-1%
<b>Mano de Obra</b>	%	29%	2%
<b>CAPEX</b>	%	8%	0%
<b>Total</b>	%	98%	2%

*Tabla 22. Estimación de costos del modelo sin optimizar FY2017- Comparado con Línea Base*

La estimación de los costos sin optimizar para el FY2017 es un poco más bajo que el FY2016, esto porque mueve menos material de Movimiento Mina y Otras Actividades.

### 6.2.3. Estimación de Costos Optimizados

Para estimar los costos optimizados, se corre el modelo en Solver Premium, dando como resultado un ahorro del 3% con respecto al caso del FY2017 sin optimizar y un 5% con respecto a la línea base, esto se muestra en la Tabla 23. Las variables operativas que hay que ejecutar para materializar el ahorro se muestran en la Tabla 24.

<b>Tipo de Costos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor Optimizado</b>	<b>%Ahorro con LB</b>
<b>Combustible</b>	%	34%	1%
<b>Mantenimiento</b>	%	26%	0%
<b>Mano de Obra</b>	%	27%	4%
<b>CAPEX</b>	%	8%	0%
<b>Total</b>	%	95%	5%

*Tabla 23. Estimación de costos del modelo Optimizado FY2017*

	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Movimiento Mina (kt)	1,537	1,181	1,428	1,314	1,378	1,538	1,160	1,138	1,047	1,503	1,518	1,424
Otras Actividades (kt)	184	176	174	188	181	187	123	168	160	200	225	515
# CAT 777 Disponibles para Mov Mina Dia	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	12.0	12.0	11.7	11.9	12.0	12.0	11.3
# CAT 777 Disponibles para Mov Mina Noche	10.9	5.9	10.4	7.4	8.4	9.0	2.5	4.7	1.9	9.5	11.0	11.3
# CAT 777 Disponibles para Otras Actividades 24 h	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.7
# CAT 773 Disponibles para Otras Actividades 24 h	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	0.8	0.7	1.0	1.5	1.7	3.0
Horas requeridas CAT 777 Mov Mina	6,338	4,819	5,782	5,458	5,664	6,364	4,638	4,658	4,283	6,108	6,257	5,869
Horas requeridas CAT 777 Otras Actividades	48	53	53	56	42	15	27	185	48	0	0	380
Horas requeridas CAT 773 Otras Actividades	691	649	643	695	686	753	471	420	592	830	935	1,562
Número Operadores Turnos 4x4	2	12	3	9	7	6	19	14	20	5	2	0
Número Operadores Turnos 2x2x4	49	29	47	35	39	41	13	23	12	44	51	60

Tabla 24. Resultados de la optimización – Variables operativas FY2017

De acuerdo a los resultados de la optimización se observa que en este caso contrario al ejercicio del FY2016, los ahorros no solo se concentran en la mano de obra, aunque sigue siendo el del mayor impacto, sino que el mantenimiento y combustible también aportan al ahorro por una mejor configuración de movimientos entre flotas.

### 6.3. Año Financiero 2018

Para este ejercicio se consideran los mismos costos financieros que en el FY2016 y mostrados en la Tabla 14.

#### 6.3.1. Datos de entrada

Los datos operativos de entrada son los planeados para el FY2018 y son mostrados en Tabla 25.

#### 6.3.2. Estimación de Costos sin Optimizar

Para el año financiero 2018 se usan los datos planeados en número de camiones y operadores, tanto en el turno de día como en la noche y se muestran en la Tabla 26, con los cuales se hacen las estimaciones de costos, mostrados en la Tabla 27.

	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
<b>Movimiento Mina (kt)</b>	1,695	1,667	1,591	1,654	1,593	1,636	1,451	1,642	1,786	1,385	1,354	1,419
<b>Otras Actividades (kt)</b>	238	345	221	196	185	226	209	204	184	160	256	207
<b>Productividad Mov. Mina CAT777 (t/h)</b>	256	260	256	253	255	256	256	256	252	246	248	253
<b>Productividad CAT 777 Otras Actividades (t/h)</b>	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362
<b>Productividad CAT 773 Otras Actividades (t/h)</b>	241	241	241	241	241	241	241	241	241	241	241	241
<b>Horas Calendario x Utilización (Día CAT 777)</b>	303	305	287	306	289	319	321	290	292	277	291	293
<b>Horas Calendario x Utilización (Noche CAT 777)</b>	244	226	230	265	258	233	279	261	291	241	243	225
<b>Horas Calendario x Utilización (24h)</b>	548	531	517	571	547	553	600	550	583	519	534	518

Tabla 25. Datos operativos de entrada FY2018

	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
<b># CAT 777 Disponibles para Mov Mina Dia</b>	12	12	12	12	12	12	10	12	13	11	10	11
<b># CAT 777 Disponibles para Mov Mina Noche</b>	12	12	12	11	11	11	9	11	10	11	10	11
<b># CAT 777 Disponibles para Otras Actividades 24 hr</b>												
<b># CAT 773 Disponibles para Otras Actividades 24 hr</b>	2	4	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2
<b>Horas requeridas CAT 777 Mov Mina</b>	6,626	6,400	6,205	6,541	6,241	6,390	5,673	6,411	6,727	5,587	5,453	5,607
<b>Horas requeridas CAT 777 Otras Actividades</b>												
<b>Horas requeridas CAT 773 Otras Actividades</b>	956	1,578	785	832	830	937	938	916	822	564	912	773
<b>Número Operadores Turnos 4x4</b>	1	1	1	2	2	2	3	4	5	1	1	1
<b>Número Operadores Turnos 2x2x4</b>	57	63	55	52	52	54	44	52	49	48	49	51

Tabla 26. Resultados sin optimizar – Planeados para el FY2018

<b>Tipo de Costos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor Sin Optimizar</b>	<b>%Ahorro con LB</b>
<b>Combustible</b>	%	38%	-2%
<b>Mantenimiento</b>	%	28%	-3%
<b>Mano de Obra</b>	%	34%	-4%
<b>CAPEX</b>	%	8%	0%
<b>Total</b>	%	109%	-9%

*Tabla 27. Estimación de costos del modelo sin optimizar FY2018*

La estimación de los costos sin optimizar es más alto en un 9% que los del FY2016, y un 10% que los del FY2017, esto a pesar que el movimiento de material es un 15% más alto, se explica porque el plan considera una configuración diferente en la noche que en el día por tener más paradas de proceso.

### 6.3.3. Estimación de Costos Optimizados

Para estimar los costos optimizados, se corre el modelo en Solver Premium, dando como resultado un ahorro del 3%, esto se muestra en la Tabla 28. Las variables operativas que hay que ejecutar para materializar el ahorro se muestran en la Tabla 29.

<b>Tipo de Costos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor Optimizado</b>	<b>%Ahorro con LB</b>
<b>Combustible</b>	%	38%	-3%
<b>Mantenimiento</b>	%	29%	-3%
<b>Mano de Obra</b>	%	31%	0%
<b>CAPEX</b>	%	8%	0%
<b>Total</b>	%	106%	-6%

*Tabla 28. Estimación de costos del modelo Optimizado FY2018*



	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
<b>Movimiento Mina (kt)</b>	1,816	1,684	1,457	1,792	1,602	1,485	1,583	1,562	1,907	1,270	1,423	1,292
<b>Otras Actividades (kt)</b>	238	345	221	196	185	226	209	204	184	160	256	207
<b># CAT 777 Disponibles para Mov Mina Dia</b>	13.0	13.0	13.0	12.9	12.9	13.0	12.9	13.0	13.0	13.0	13.0	12.9
<b># CAT 777 Disponibles para Mov Mina Noche</b>	13.0	11.1	8.5	11.9	9.9	7.1	7.4	9.0	13.0	6.5	8.0	5.9
<b># CAT 777 Disponibles para Otras Actividades 24 h</b>	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
<b># CAT 773 Disponibles para Otras Actividades 24 h</b>	1.8	2.7	1.8	1.2	1.2	1.7	1.3	1.5	1.3	1.3	2.0	1.5
<b>Horas requeridas CAT 777 Mov Mina</b>	7,101	6,466	5,683	7,088	6,275	5,798	6,189	6,101	7,561	5,161	5,731	5,105
<b>Horas requeridas CAT 777 Otras Actividades</b>	19	0	7	67	57	0	77	13	22	12	0	53
<b>Horas requeridas CAT 773 Otras Actividades</b>	958	1,433	906	713	683	936	750	826	729	648	1,064	777
<b>Número Operadores Turnos 4x4</b>	0	4	9	2	6	12	11	8	0	13	10	14
<b>Número Operadores Turnos 2x2x4</b>	59	55	41	53	45	35	35	42	57	31	40	30

*Tabla 29. Resultados de la optimización – Variables operativas FY2018*

Esta corrida de optimización tiene menos ahorro en porcentaje que el de los años anteriores porque el plan ya considera diferentes configuraciones de camiones disponibles en los diferentes turnos de día y de noche, aunque se muestra que es posible ahorrar un 3% más, solo con una óptima reconfiguración del uso de la flota. En este caso la mano de obra es la que soporta el ahorro, en recargos nocturnos y por tener menos operadores que en el caso sin optimizar.

#### 6.4. Año Financiero 2019

Para este ejercicio se consideran los mismos costos financieros que en el FY2016 y mostrados en la Tabla 14.

##### 6.4.1. Datos de entrada

Los datos operativos de entrada son los planeados para el FY2019 y son mostrados en Tabla 30.

##### 6.4.2. Estimación de Costos sin Optimizar

Para el año financiero 2019 se usan los datos planeados en número de camiones y operadores, tanto en el turno de día como en la noche y se muestran en la Tabla 31, con los cuales se hacen las estimaciones de costos, mostrados en la Tabla 32.

	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Movimiento Mina (kt)	1,333	1,221	1,136	1,186	1,110	1,288	1,106	889	1,041	1,013	1,111	945
Otras Actividades (kt)	649	587	367	506	561	630	540	604	501	367	556	481
Productividad Mov. Mina CAT777 (t/h)	246	246	248	252	250	245	249	253	251	251	250	256
Productividad CAT 777 Otras Actividades (t/h)	307	307	307	307	307	307	307	307	307	307	307	307
Productividad CAT 773 Otras Actividades (t/h)	197	197	197	197	197	197	197	197	197	197	197	197
Horas Calendario x Utilización (Dia CAT 777)	305	306	294	297	285	320	321	290	303	281	292	293
Horas Calendario x Utilización (Noche CAT 777)	249	234	252	239	251	270	302	274	299	248	246	226
Horas Calendario x Utilización (24h)	553	540	546	536	537	590	623	564	602	528	538	520

Tabla 30. Datos operativos de entrada FY2019

	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
# CAT 777 Disponibles para Mov Mina Dia	13.7	12.6	10.4	11.4	11.9	12.8	11.1	10.8	10.5	10.0	11.3	9.6
# CAT 777 Disponibles para Mov Mina Noche	12.5	11.9	9.7	11.2	11.0	11.0	9.2	9.1	8.1	9.6	10.8	9.5
# CAT 777 Disponibles para Otras Actividades 24 hr												
# CAT 773 Disponibles para Otras Actividades 24 hr	0.8	0.7	0.3	1.0	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.7
Horas requeridas CAT 777 Mov Mina	7,273	6,642	5,519	6,072	6,152	7,059	6,311	5,646	5,629	5,190	5,976	4,985
Horas requeridas CAT 777 Otras Actividades												
Horas requeridas CAT 773 Otras Actividades	533	476	294	617	447	517	70	68	62	97	369	489
Número Operadores Turnos 4x4	3	2	2	1	2	4	4	4	5	1	2	1
Número Operadores Turnos 2x2x4	54	51	41	49	47	47	37	37	33	39	45	42

Tabla 31. Resultados sin optimizar – Planeados para el FY2019

<b>Tipo de Costos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor Sin Optimizar</b>	<b>%Ahorro con LB</b>
<b>Combustible</b>	%	36%	0%
<b>Mantenimiento</b>	%	26%	0%
<b>Mano de Obra</b>	%	29%	2%
<b>CAPEX</b>	%	8%	0%
<b>Total</b>	%	99%	1%

*Tabla 32. Estimación de costos del modelo sin optimizar FY2019*

La estimación de los costos sin optimizar es 1% menor que los del FY2016 y un 9% menor que el del FY2018, debido a que tiene un 10% menos de movimiento planeado.

#### 6.4.3. Estimación de Costos Optimizados

Para estimar los costos optimizados, se corre el modelo en Solver Premium, dando como resultado un ahorro del 3%, esto se muestra en la Tabla 33. Las variables operativas que hay que ejecutar para materializar el ahorro se muestran en la Tabla 34.

<b>Tipo de Costos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor Optimizado</b>	<b>%Ahorro con LB</b>
<b>Combustible</b>	%	35%	0%
<b>Mantenimiento</b>	%	26%	0%
<b>Mano de Obra</b>	%	26%	4%
<b>CAPEX</b>	%	8%	0%
<b>Total</b>	%	95%	5%

*Tabla 33. Estimación de costos del modelo Optimizado FY2019*

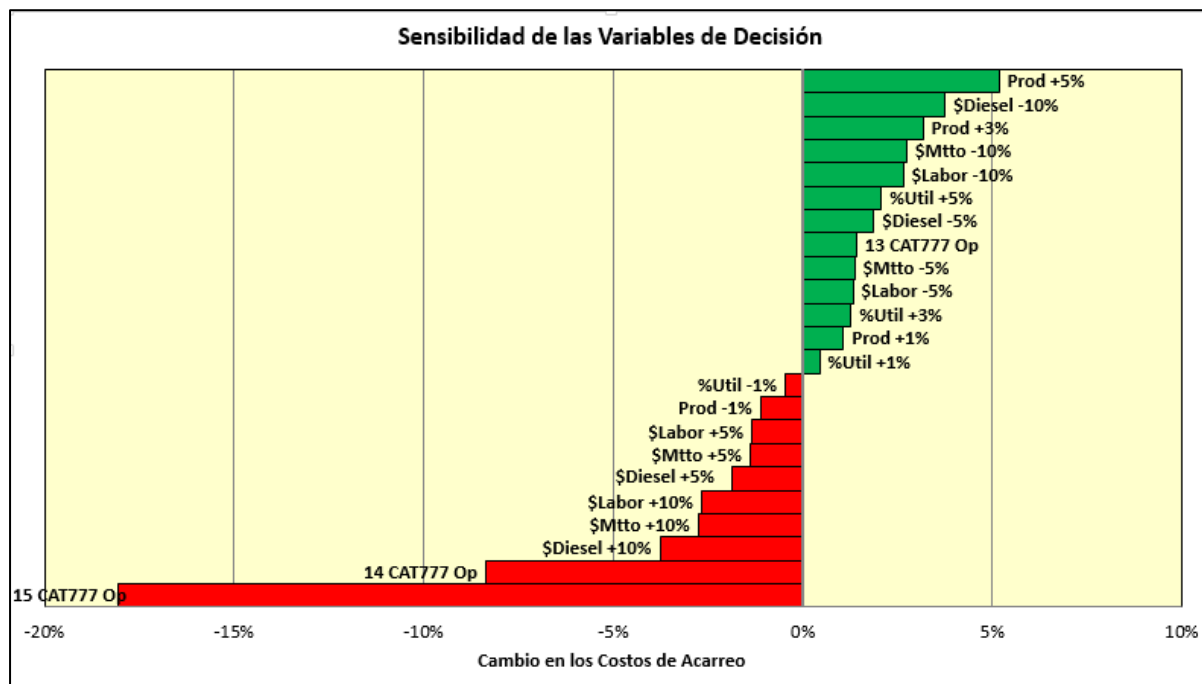
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
<b>Movimiento Mina (kt)</b>	1,447	1,109	1,244	1,077	1,130	1,269	1,200	792	1,144	989	1,080	896
<b>Otras Actividades (kt)</b>	649	587	367	506	561	630	540	604	501	367	556	481
<b># CAT 777 Disponibles para Mov Mina Dia</b>	11.1	11.4	10.8	11.5	9.6	9.7	10.2	9.7	10.3	10.7	9.6	11.7
<b># CAT 777 Disponibles para Mov Mina Noche</b>	10.1	4.4	7.3	3.5	7.1	7.7	5.2	1.2	4.8	3.7	6.1	0.2
<b># CAT 777 Disponibles para Otras Actividades 24 h</b>	1.9	1.6	2.2	1.5	3.4	3.3	2.8	3.3	2.7	2.3	3.4	1.3
<b># CAT 773 Disponibles para Otras Actividades 24 h</b>	3.0	3.0	0.0	2.5	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	2.8
<b>Horas requeridas CAT 777 Mov Mina</b>	5,891	4,511	5,020	4,272	4,520	5,171	4,829	3,128	4,557	3,940	4,329	3,504
<b>Horas requeridas CAT 777 Otras Actividades</b>	1,052	873	1,195	788	1,826	1,943	1,758	1,875	1,630	1,196	1,810	650
<b>Horas requeridas CAT 773 Otras Actividades</b>	1,660	1,620	0	1,340	0	168	0	141	0	0	0	1,429
<b>Número Operadores Turnos 4x4</b>	2	14	7	16	5	4	10	17	11	14	7	23
<b>Número Operadores Turnos 2x2x4</b>	60	36	38	30	42	45	32	19	30	24	38	17

*Tabla 34. Resultados de la optimización – Variables operativas FY2019*

De acuerdo a los resultados de la optimización se observa que los ahorros están en la mano de obra, alcanzando un ahorro similar al presentado en el FY18.

### 6.5. Sensibilización de las Principales variables

Con el objetivo de identificar que tan sensibles son las variables y evaluar el impacto que estas tienen en los costos de acarreo, se realizaron varias optimizaciones y se generó la gráfica identificada en la Figura 24.



*Figura 22. Sensibilidad Principales Variables*

De la gráfica se puede observar que la variable más sensible y que genera los mayores impactos positivos es la Productividad, realizar esfuerzos para incrementar la Productividad en un 5% puede generar ahorros del 5% en el total del costo de Acarreo de materiales en la Mina, así mismo, lograr una reducción en la tarifa de combustible del 10% puede generar impactos positivos en un 4%. Incrementar el número de camiones en la mina hasta 13 unidades puede

generar ahorros, pero superar esta cantidad puede generar sobre costos significativos ya que se debe incurrir en la compra de activos o en contratos de alquiler de maquinaria que no alcanzan a pagar el ahorro en mano de obra que se busca.

Realizar una mezcla de optimizaciones entre las principales variables puede generar ahorros significativos de más del 12% de los costos totales de la operación de acarreo de materiales en la mina.

En la Tabla 35 se puede observar un porcentaje de ahorro del 14% para los costos del año financiero FY18.

CASO INICIAL	VALOR	% Ahorro
Caso Base Modelo Sin Optimizar FY18	109%	-9%
Modelo Optimizado FY18 (13 Camiones 777 y 3 Camiones 773)	106%	-6% %
Modelo Optimizado FY18 Mezcla Sensibilidades*	95%	5% %

*Tabla 35. Sensibilidad Principales Variables FY18*

En la Tabla 36 se puede observar un porcentaje de ahorro del 13% para los costos del año financiero FY2019 con respecto al caso sin optimizar.

CASO INICIAL	VALOR	% Ahorro
Caso Base Modelo Sin Optimizar FY19	99%	1%
Modelo Optimizado FY19 (13 Camiones 777 y 3 Camiones 773)	95%	5%
Modelo Optimizado FY19 Mexcla Sensibilidades*	86%	14%

*Tabla 36. Sensibilidad Principales Variables FY19*

## 7. Plan de Acción

Con los resultados obtenidos se puede hacer un plan de acción para equilibrar la productividad y los costos y lograr una óptima eficiencia, es decir, lograr la producción planeada al costo más bajo posible (Caterpillar 2016). En la Tabla 37 se muestra el plan de acción propuesto para lograr dicho objetivo.



Ítem	Que	Quién	Como	Cuando	Dónde	Por Qué
1	Controlar las Variables sensibles (Productividad, Utilización, Paradas de proceso) de los equipos de acarreo	Controlador de despacho de flota	Realizando monitoreo en línea de las productividades de los equipos	Diario	Operación Mina	Vigilancia del rendimiento de los recursos
2	Realizar entrenamientos a Operadores y Controladores en sistema de administración de flota enfocado en las variables sensibles del sistema	Ingeniero Administrador de sistema de despacho	Entrenamiento a Operadores y Controladores en el correcto uso del sistema	Urgente	Operación Mina	Tener datos limpios y correctos para su análisis
3	Realizar análisis estadístico Mensual del comportamiento de las variables sensibles (Productividad, Utilización, Tiempos de Ciclo, longitudes de Ciclos, Paradas de Proceso)	Ingeniero Administrador de sistema de despacho	Descargando del sistema de administración de flota la base de datos y realizando el análisis estadístico.	Mensual	Operación Mina	Para asegurar que las implementaciones están acordes con los requerimientos de la optimización
4	Realizar diseños de Rutas de acarreo con optimización de longitudes de ciclo	Ingeniero de Diseño minero	Realizando alternativas de diseño y evaluando las más productivas	Anual	Planeación	Para mejorar la productividad de los equipos desde la planeación
5	Mejorar la Productividad de los equipos de acarreo mediante estrategias que impliquen mejorar estado de vías, PARE's, intersecciones, aumento de velocidad media, etc.	Superintendente de operación Mina	Implementando proyectos de Mejoramiento de Vías (aumento de velocidad media), Realizando análisis de intersecciones y eliminando PARE's	Continuo	Operación Mina	Para mejorar las condiciones de seguridad, mejorar los tiempos de ciclo y evitar tiempos muertos
6	Mejora la Utilización de los equipos de acarreo mediante estrategias que disminuyan las paradas de Proceso (Alimentación, cambios de turno, Servicios, etc.)	Superintendente de operación Mina	Realizando Relevos de equipos, implementando tanqueo de equipos en tiempos muertos	Continuo	Operación Mina	Para mejorar el uso de los recursos disponibles
7	Realizar seguimiento al número de camiones propuestos por el modelo mes a mes y según su turno (día, noche)	Superintendente de operación Mina	Parando y activando la cantidad de camiones requeridos en cada turno	Mensual	Operación Mina	Para asegurar los ahorros identificados en la optimización
8	Realizar estrategia de implementación de Mantenimiento preventivo de los equipos de acarreo en turno nocturno	Superintendente de Mantenimiento Mina	Programando los Mantenimientos Preventivos en turno nocturno	Continuo	Mantenimiento Mina	Para garantizar mayor disponibilidad de recursos en el turno diurno
9	Realizar estrategias de Disminución de Tarifa de Combustible	Superintendente de Suministros	Negociación con proveedores y evaluando alternativas de Combustibles	Anual	Suministros	Para asegurar ahorros por concepto de tarifa

*Tabla 37. Plan de acción recomendado para la implementación del modelo optimizado*

## 8. CONCLUSIONES

La optimización de la flota de acarreo minero es una actividad que siempre se debe hacer en el negocio minero porque es la que genera los mayores costos del negocio minero.

Con el ejercicio realizado hemos encontrado que aún existen oportunidades de ahorro en CMSA en los costos de acarreo y que con la elaboración de un plan de acción detallado enfocado en las variables identificadas como sensibles se pueden lograr ahorro hasta del 12% para la compañía.

El principal hallazgo es la identificación de una oportunidad de ahorro que varía entre el 3% y el 6% sin necesidad de incurrir en acciones que impliquen inversiones de capital, solamente con realizar una reconfiguración del esquema de trabajo, modificando levemente el plan de producción mensual, realizando cambios en los turnos rotativos, aplicando la fuerza laboral en su mayor parte en el día y eliminando los recargos nocturnos es posible lograr estos ahorros. Aquí debe existir una sinergia entre las áreas de Planeación, Operación y Mantenimiento Mina para lograr capturar estos ahorros.

Otra conclusión importante es conocer la sensibilidad que tienen las diferentes variables en función del costo operativo y proponer acciones encaminadas a mejorar la productividad de los equipos de acarreo para incrementar notablemente los potenciales ahorros.

Este modelo es una herramienta de trabajo que es útil para la planeación minera que permite encontrar de forma rápida la óptima configuración de la flota de acarreo, es decir

utilizando este método, el Ingeniero de Planeación Minera pueda estar seguro y confiado de que sus datos van a agregar valor al negocio minero.

## ANEXO 1

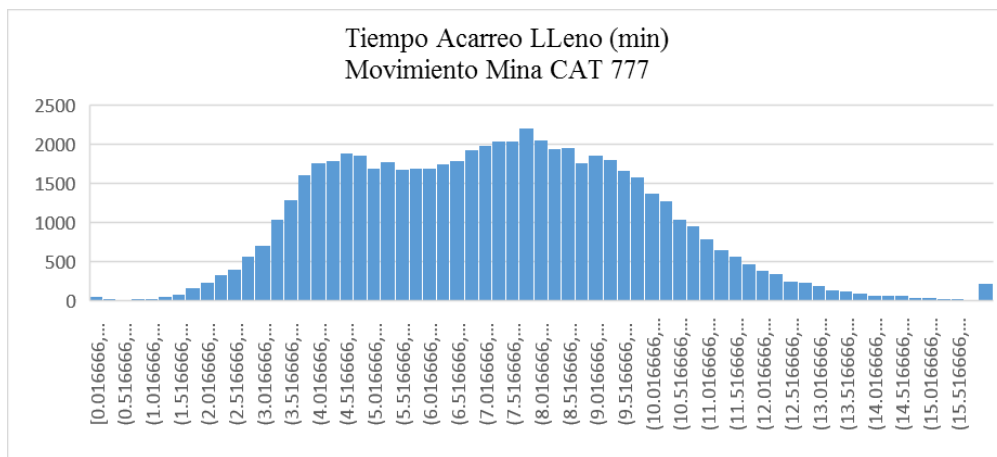
*Anexo 1, Estadísticas para las variables de tiempo de ciclo para la Flota de Acarreo*

En este anexo se presentan las estadísticas de las diferentes variables del tiempo de ciclo para la flota de acarreo CAT 777, estos datos corresponden al período de octubre de 2015 a mayo de 2016 y tomados de la base de datos del sistema de despacho de la Mina (MODULAR), se presenta una estadística descriptiva y un histograma para cada variable del tiempo de ciclo de un camión.

**Tiempos de Ciclos para Movimiento Mina**

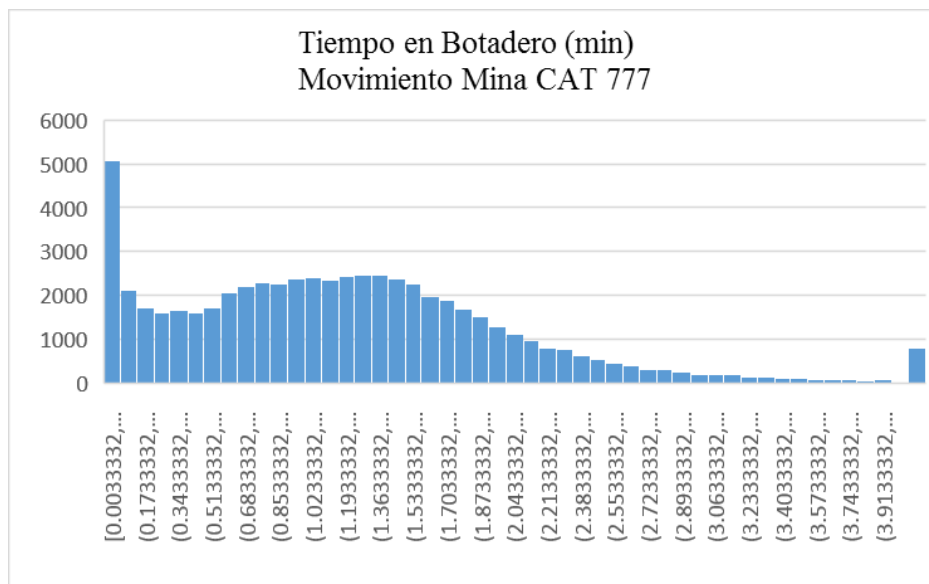
## Tiempo de Acarreo Lleno

<u>Acarreo_lleno (min)</u>	
Mean	7.33
Standard Error	0.01
Median	7.30
Mode	7.60
Standard Deviation	2.76
Sample Variance	7.63
Kurtosis	12.24
Skewness	1.03
Range	79.92
Minimum	0.02
Maximum	79.93
Sum	443272.37
Count	60473.00
Confidence Level (95.0%)	0.02



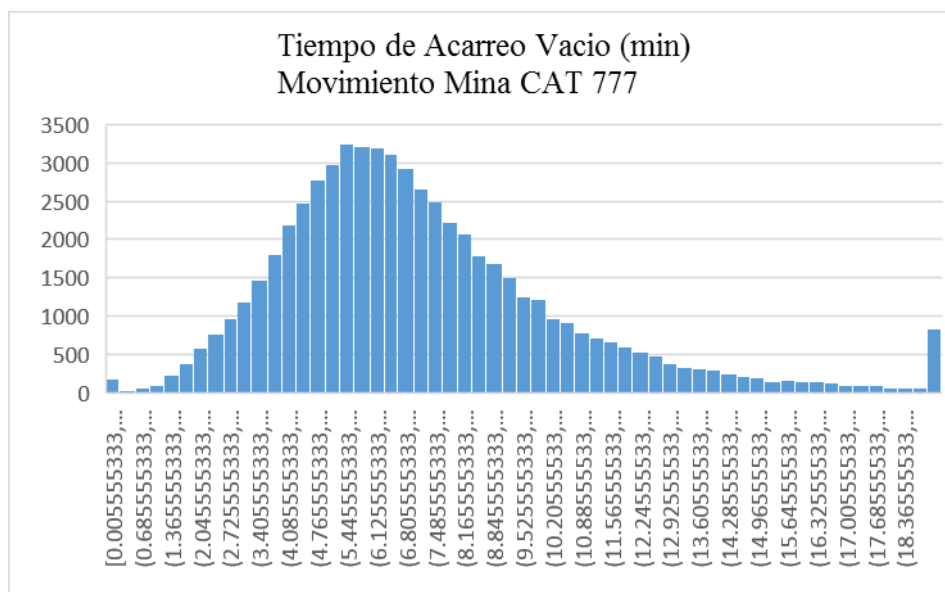
### Tiempo en Botadero

<i>Botadero</i>	
Mean	1.23
Standard Error	0.00
Median	1.15
Mode	0.03
Standard Deviation	0.95
Sample Variance	0.90
Kurtosis	17.98
Skewness	2.38
Range	17.86
Minimum	0.00
Maximum	17.87
Sum	74657.94
Count	60473.00
Confidence Level(95.0%)	0.01



### Tiempo de Acarreo Vacío

<i>Acarreo_vacio</i>	
Mean	7.41
Standard Error	0.02
Median	6.73
Mode	5.45
Standard Deviation	3.85
Sample Variance	14.79
Kurtosis	50.98
Skewness	3.58
Range	144.71
Minimum	0.01
Maximum	144.72
Sum	448185.48
Count	60473.00
Confidence Level(95.0%)	0.03



### Tiempo de Espera

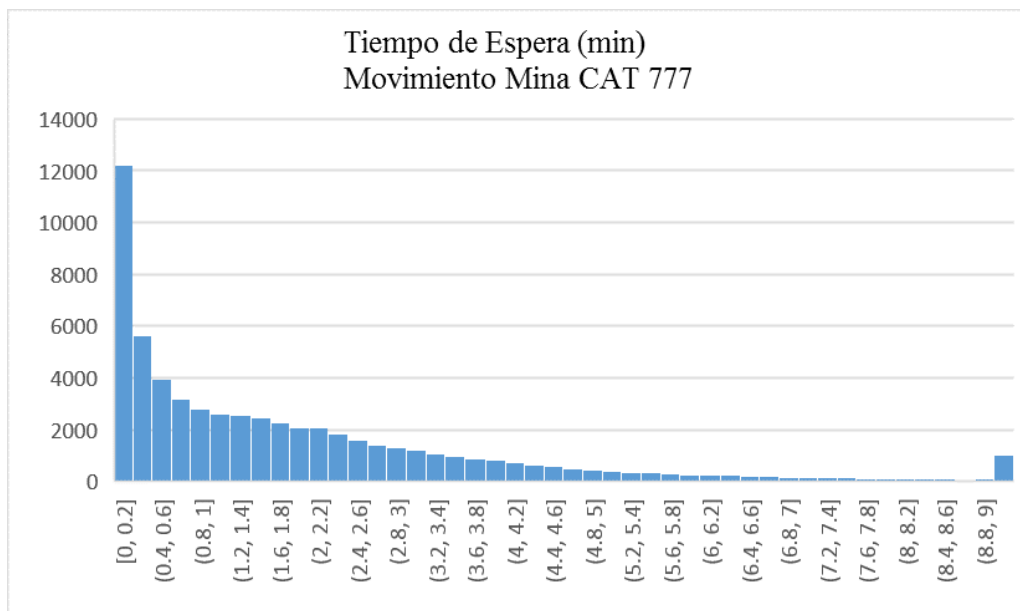
---

#### *Acumulamiento\_espera*

---

Mean	1.87
Standard Error	0.01
Median	1.19
Mode	0.00
Standard Deviation	2.23
Sample Variance	4.98
Kurtosis	12.68
Skewness	2.69
Range	29.87
Minimum	0.00
Maximum	29.87
Sum	113007.44
Count	60473.00
Confidence Level(95.0%)	0.02

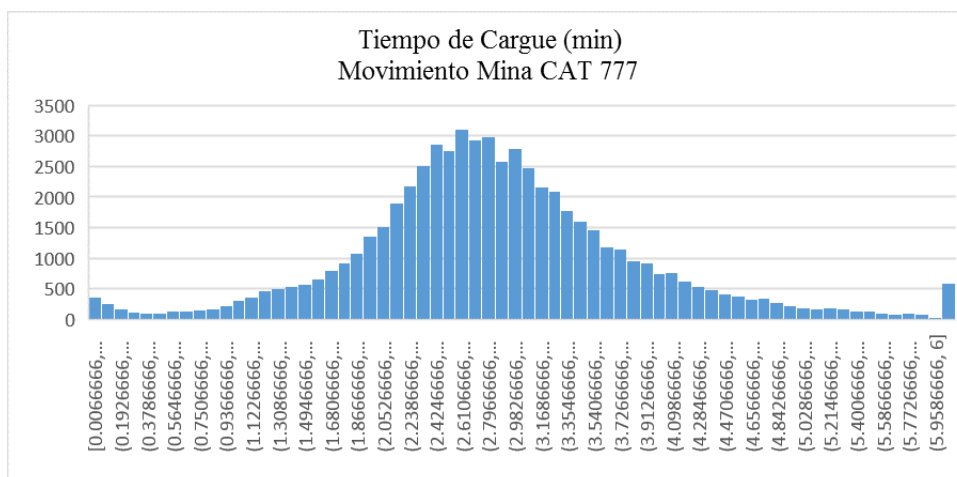
---



### Tiempo de Cargue

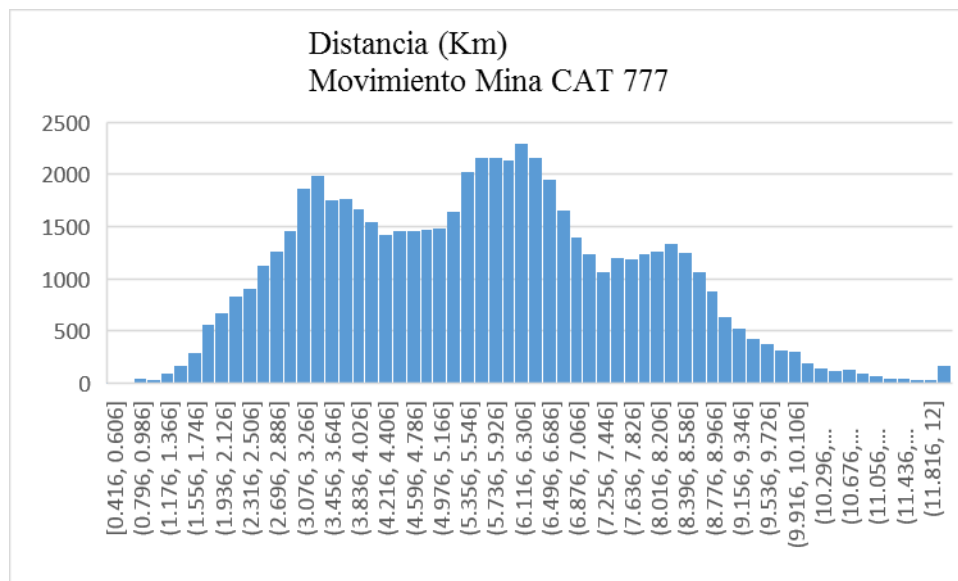
<i>Cargue</i>	
Mean	2.90
Standard Error	0.00
Median	2.83
Mode	2.60
Standard Deviation	1.04
Sample Variance	1.09
Kurtosis	6.90
Skewness	0.85
Range	25.45
Minimum	0.01
Maximum	25.46
Sum	175424.58
Count	60473.00
Confidence Level (95.0%)	0.01





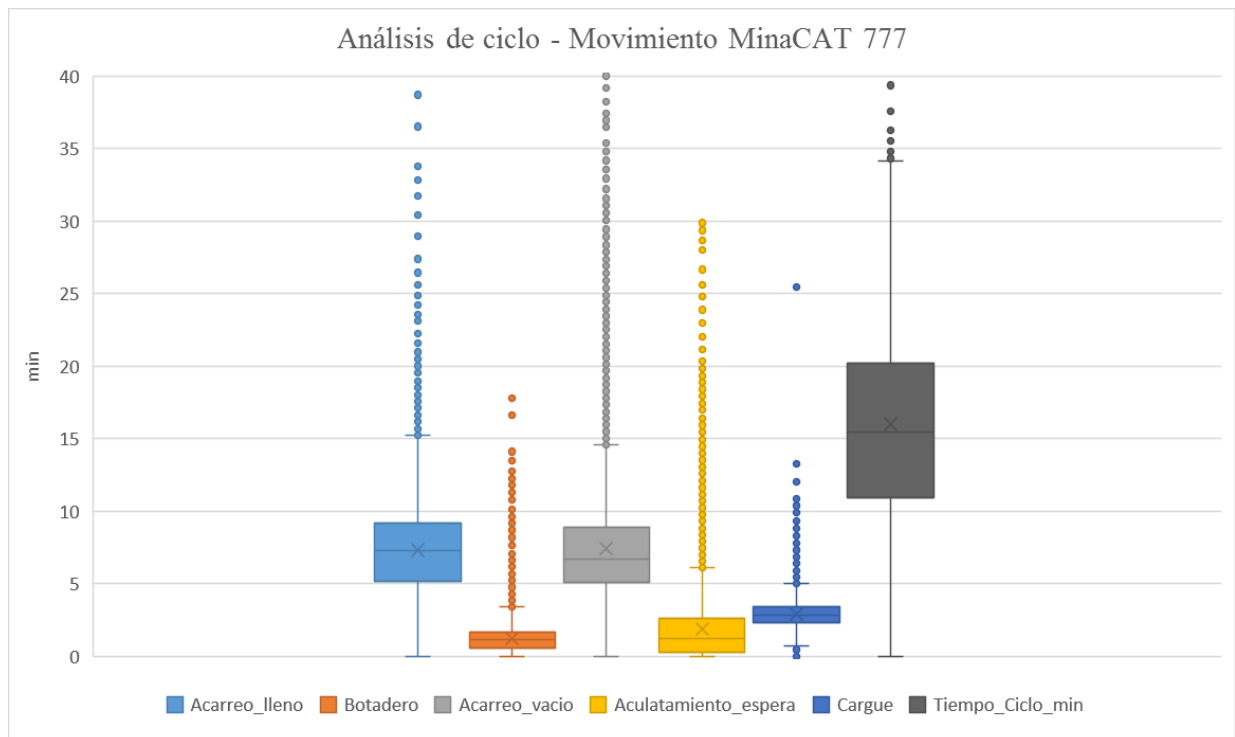
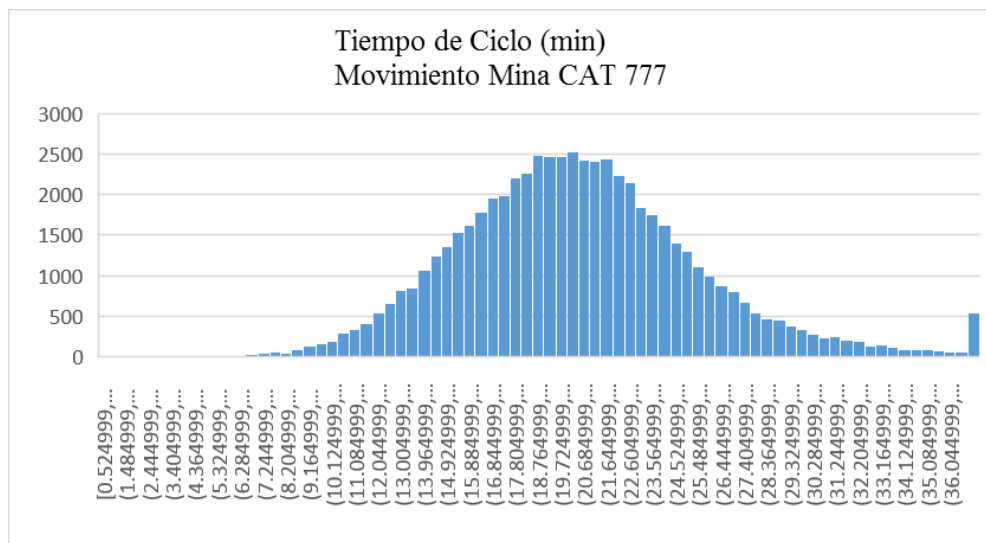
Distancia de ciclo en kilometro

<i>Distancia_KM</i>	
Mean	5.64
Standard Error	0.01
Median	5.65
Mode	3.27
Standard Deviation	2.15
Sample Variance	4.64
Kurtosis	-0.08
Skewness	0.31
Range	23.83
Minimum	0.42
Maximum	24.24
Sum	341115.04
Count	60473.00
Confidence Level(95.0%)	0.02



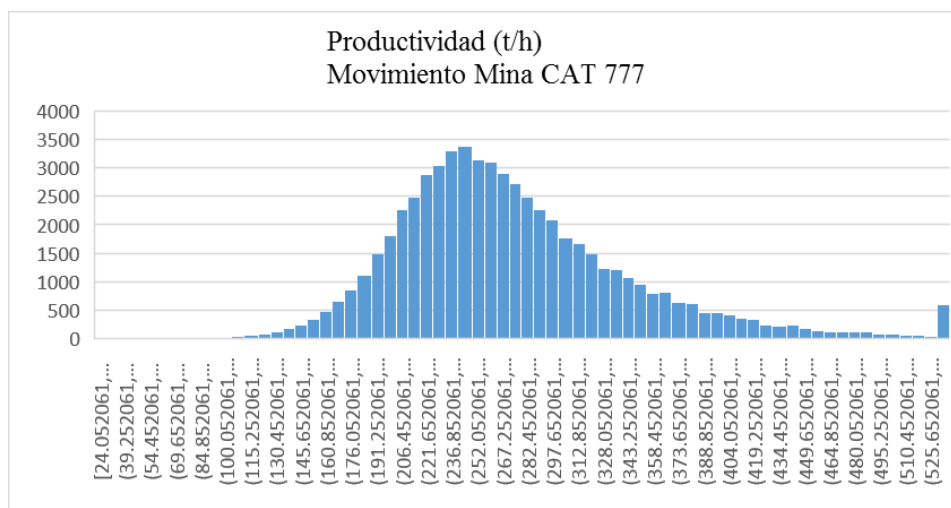
Tiempo de Ciclo en minutos

<i>Tiempo_Ciclo_min</i>	
Mean	20.75
Standard Error	0.02
Median	20.41
Mode	20.43
Standard Deviation	5.38
Sample Variance	28.99
Kurtosis	16.73
Skewness	1.56
Range	167.16
Minimum	0.52
Maximum	167.68
Sum	1254547.80
Count	60473.00
Confidence Level(95.0%)	0.04



Productividad (t/h)

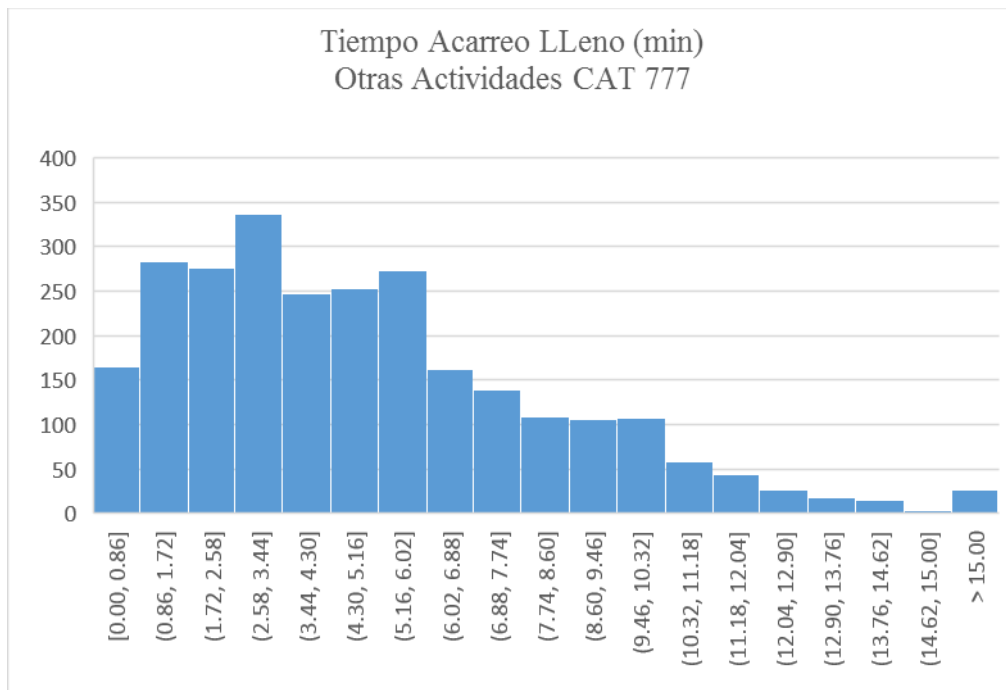
<i>Tasa_Ton_hr</i>	
Mean	278.56
Standard Error	0.35
Median	264.78
Mode	264.57
Standard Deviation	84.91
Sample Variance	7208.87
Kurtosis	505.04
Skewness	9.76
Range	6324.53
Minimum	24.05
Maximum	6348.58
Sum	16845174.21
Count	60473.00
Confidence Level(95.0%)	0.68



### Tiempos de Ciclos para Otras Actividades

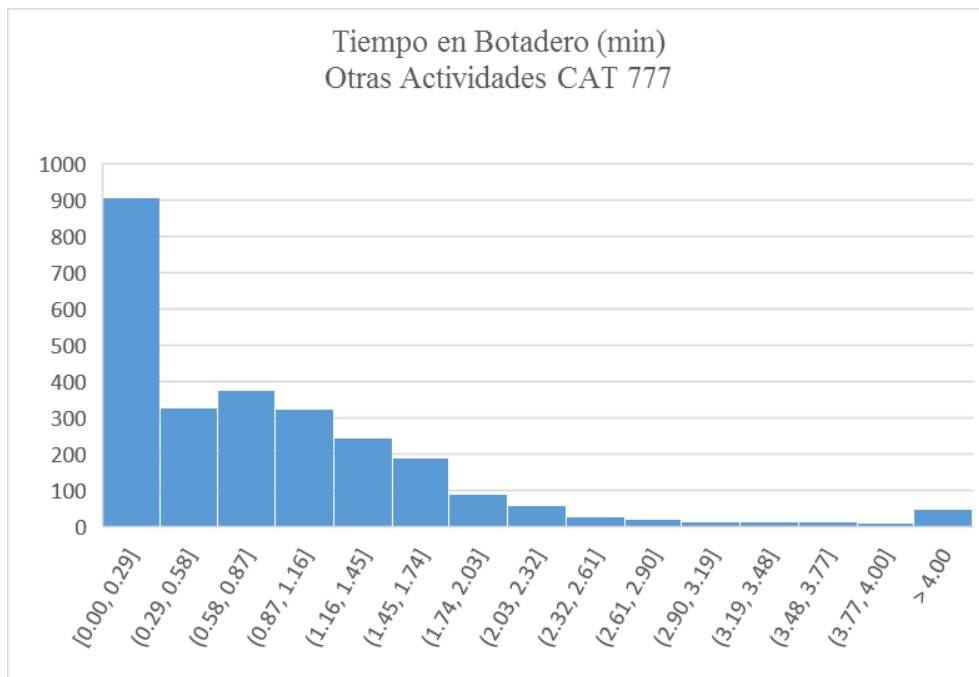
#### Tiempo de Acarreo Lleno

<i>Acarreo_lleno</i>	
Mean	4.94
Standard Error	0.07
Median	4.36
Mode	0.00
Standard Deviation	3.38
Sample Variance	11.42
Kurtosis	1.68
Skewness	1.07
Range	26.67
Minimum	0.00
Maximum	26.67
Sum	13072.33
Count	2646.00
Largest(95)	11.92
Smallest(5)	0.00
Confidence	
Level(95.0%)	0.13



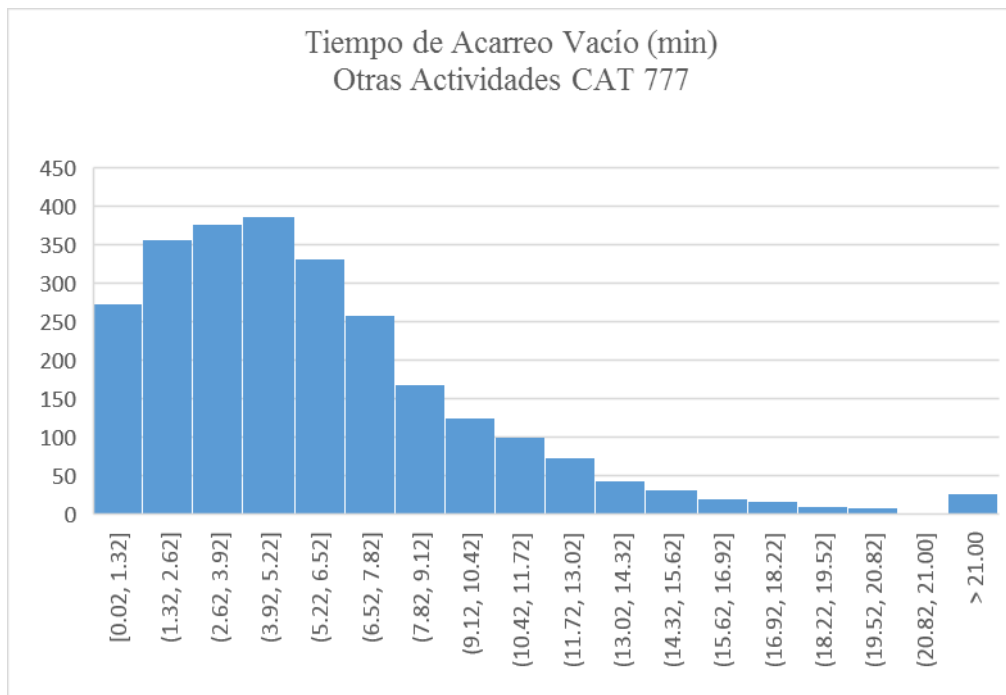
# Tiempo en Botadero

<i>Botadero</i>	
Mean	0.88
Standard Error	0.02
Median	0.65
Mode	0.03
Standard Deviation	1.15
Sample Variance	1.33
Kurtosis	36.93
Skewness	4.72
Range	15.17
Minimum	0.00
Maximum	15.17
Sum	2338.09
Count	2647.00
Largest(95)	2.90
Smallest(5)	0.00
Confidence Level(95.0%)	0.04



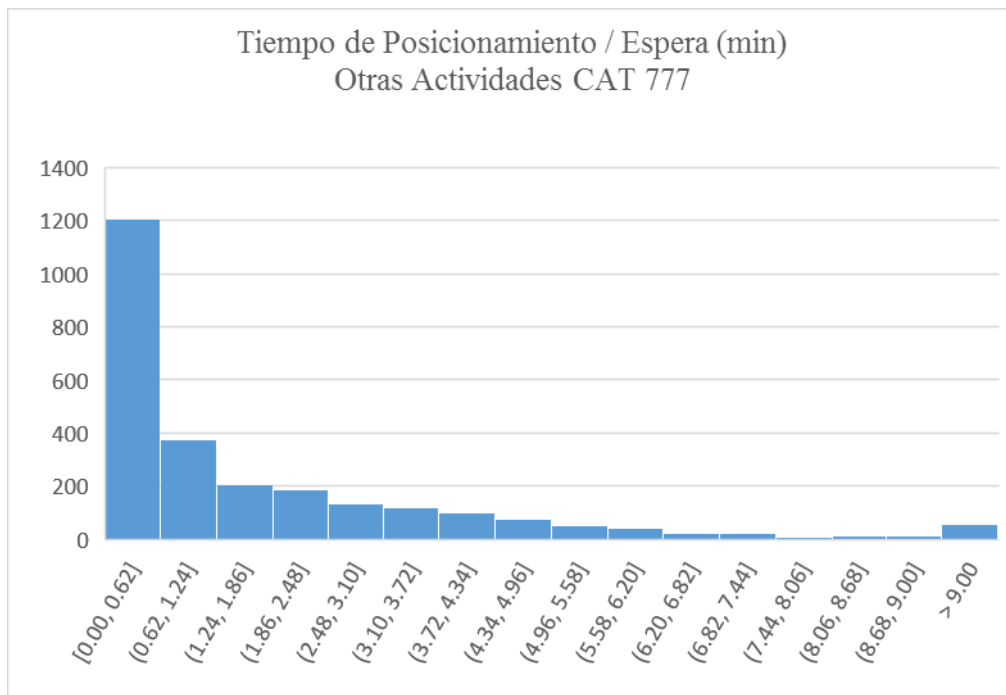
# Tiempo de Acarreo Vacío

<i>Acarreo_vacio</i>	
Mean	5.87
Standard Error	0.10
Median	4.94
Mode	0.02
Standard Deviation	5.01
Sample Variance	25.06
Kurtosis	83.29
Skewness	5.27
Range	112.08
Minimum	0.02
Maximum	112.10
Sum	15360.84
Count	2616.00
Largest(95)	15.24
Smallest(5)	0.02
Confidence Level(95.0%)	0.19



## Tiempo de Espera

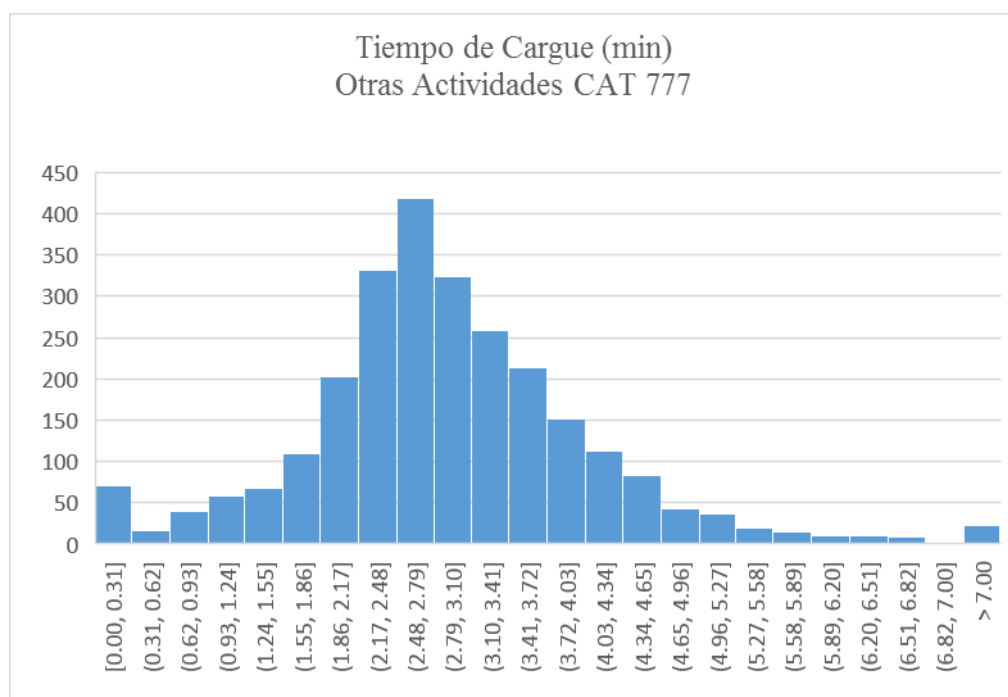
<i>Posicionamiento_espera</i>		
Mean		1.77
Standard Error		0.05
Median		0.78
Mode		0.00
Standard Deviation		2.45
Sample Variance		6.00
Kurtosis		12.25
Skewness		2.76
Range		28.20
Minimum		0.00
Maximum		28.20
Sum		4677.65
Count		2639.00
Largest (95)		7.60
Smallest (5)		0.00
Confidence	Level	
(95.0%)		0.09





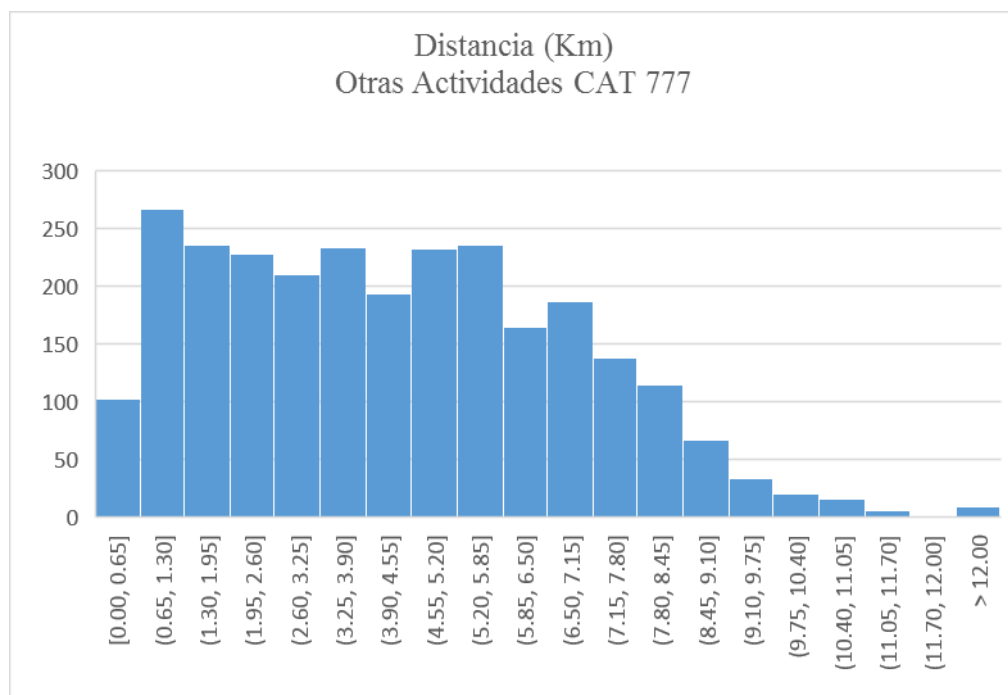
## Tiempo de Cargue

<i>Cargue</i>		
Mean		2.90
Standard Error		0.00
Median		2.83
Mode		2.60
Standard Deviation		1.04
Sample Variance		1.09
Kurtosis		6.90
Skewness		0.85
Range		25.45
Minimum		0.01
Maximum		25.46
Sum		175424.58
Count		60473.00
Confidence	Level	
(95.0%)		0.01



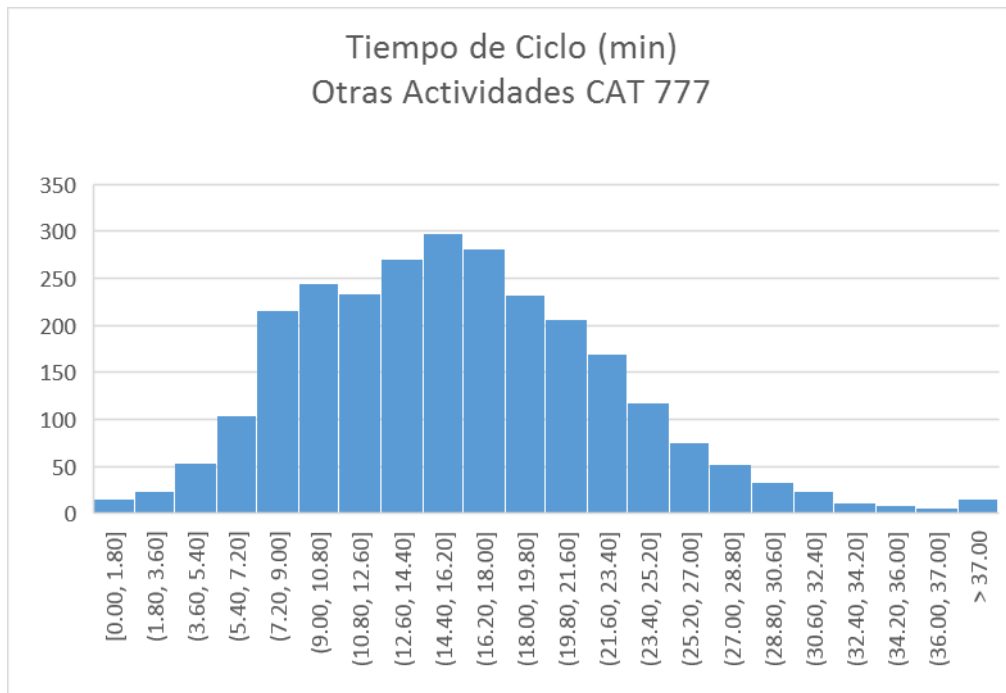
## Distancia de ciclo en kilómetros

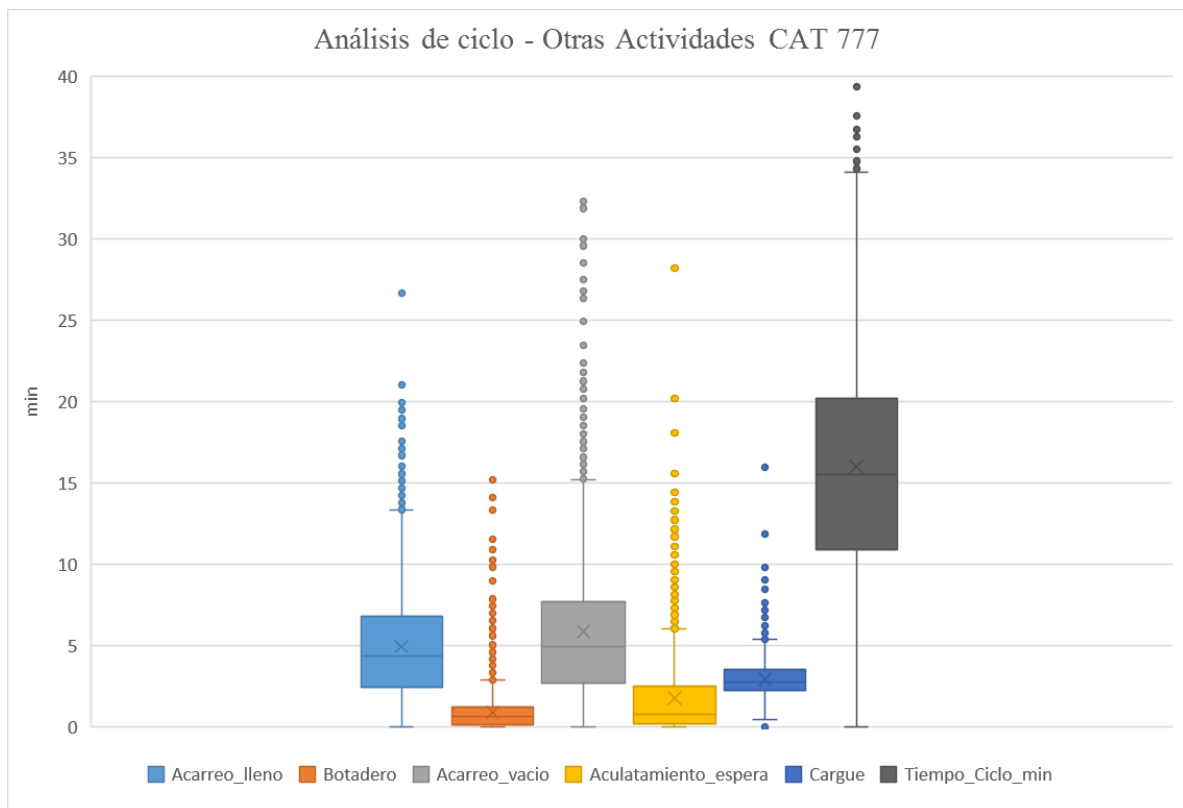
<i>Distancia_KM</i>	
Mean	5.64
Standard Error	0.01
Median	5.65
Mode	3.27
Standard Deviation	2.15
Sample Variance	4.64
Kurtosis	-0.08
Skewness	0.31
Range	23.83
Minimum	0.42
Maximum	24.24
Sum	341115.04
Count	60473.00
Confidence Level(95.0%)	0.02



# Tiempo de Ciclo en minutos

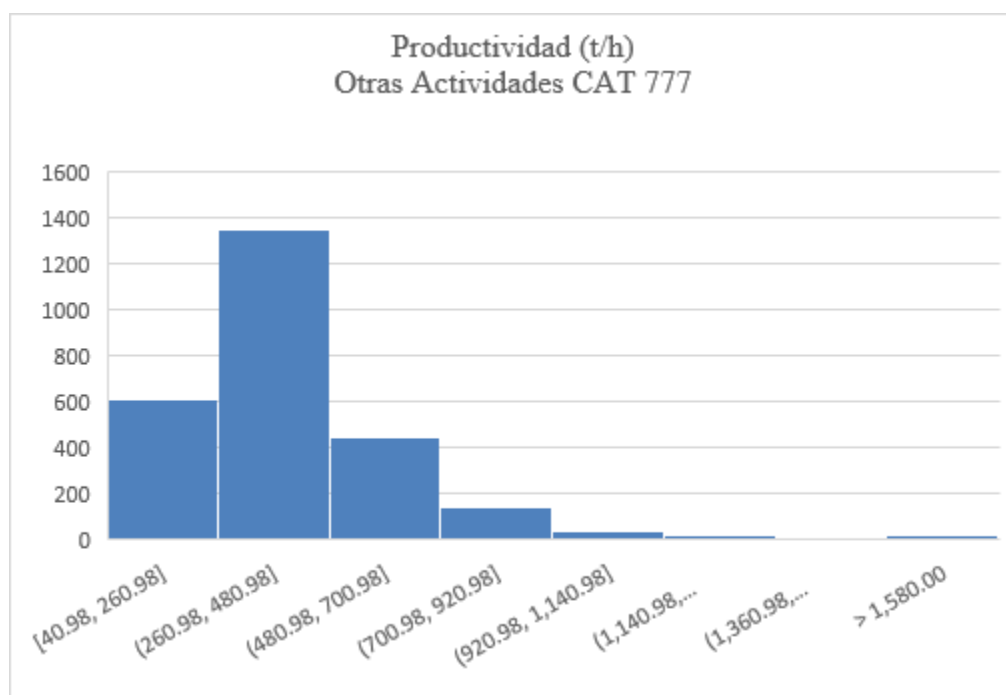
<i>Tiempo_Ciclo_min</i>	
Mean	15.99
Standard Error	0.14
Median	15.49
Mode	0.00
Standard Deviation	7.11
Sample Variance	50.50
Kurtosis	26.98
Skewness	2.16
Range	131.93
Minimum	0.00
Maximum	131.93
Sum	43068.65
Count	2694.00
Largest(95)	28.87
Smallest(5)	0.00
Confidence Level(95.0%)	0.27





Productividad (t/h)

<i>Tasa_Ton_hr</i>	
Mean	278.56
Standard Error	0.35
Median	264.78
Mode	264.57
Standard Deviation	84.91
Sample Variance	7208.87
Kurtosis	505.04
Skewness	9.76
Range	6324.53
Minimum	24.05
Maximum	6348.58
Sum	16845174.21
Count	60473.00
Confidence Level(95.0%)	0.68



## 9. LISTA DE REFERENCIAS

- Alkass, S., El-Moslmani, K., and Al-Hussein, M. (2003). A computer model for selecting equipment for earthmoving operations using queuing theory. Auckland, Proceedings, Annual CIB Conference, W78.
- Burt, B., Caccetta, L., Welgama, P., and Fouché, L. (2011). Equipment selection with heterogeneous fleets for multiple-period schedules, The Journal of the Operational Research Society, Vol. 62, No. 8, pp. 1498-1509.
- Burt, C., and Caccetta, L. (2014). Equipment Selection for Surface Mining: A Review. Interfaces, pubsonline.informs.org.
- Burt, C., Caccetta, L., Hill, S. and Welgama, P. (2005). Models for Mining Equipment Selection, MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation, 170-176.
- Cárdenas, M., y Reina, M. (2008). LA MINERIA EN COLOMBIA: IMPACTO SOCIOECONÓMICO Y FISCAL, Proyecto de la Cámara ASOMINEROS de la ANDI, FEDESARROLLO, <http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2011/08/La-miner%C3%ADa-en-Colombia-Informe-de-Fedesarrollo-2008.pdf>

Caterpillar (2016), Caterpillar Performance Handbook Ed. 46, Caterpillar, Peoria, Illinois, USA.

Cerro Matoso S.A. (2012). Mine Fleet Replacement Project, Definition Phase Study, FINAL REPORT, Montelibano.

Cerro Matoso S.A. (2016). PLAN DE TRABAJO DE EXPLORACIÓN Y DE EXPLOTACIÓN, Informe anual a la Agencia Nacional de Minería (ANM), Montelibano.

Cerro Matoso S.A. (2016). Reporte Gerencial de Desempeño Mensual - Mina FY16, Montelibano.

Elevli, S. y Elevli, B. (2010). Performance Measurement of Mining Equipments by Utilizing OEE, Acta Montanistica Slovaca Ročník 15, číslo 2, 95-101.

Escamilla, M., Meza, J. y Llamas, R. (2011). Estudio de Productividad del Equipo de Carga en una Mina de Mineral de Fierro a Cielo Abierto, Conciencia Tecnológica, núm. 42, pp. 26-30, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, México.  
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94421442005>.

Franco, G., Branch, J., Jaramillo, P. (2012). Planeamiento De Minas A Cielo Abierto Mediante Optimización Estocástica, Boletín de Ciencias de la Tierra, núm. 31, 2012, pp. 107-113, Medellín, Universidad Nacional de Colombia.

Frontline Systems, Inc. (2016). Optimization and Simulation User Guide, Version 2016-R3 for use with Excel 2007-2016, [www.solver.com](http://www.solver.com).

<http://www.banrep.gov.co/es/pib>

<https://www.south32.net/our-operations/australia/colombia>

Lin, M. H., Tsai, J. F., and Yu, C. S. (2012). A Review of Deterministic Optimization Methods in Engineering and Management. Hindawi Publishing Corporation. Mathematical Problems in Engineering. Volume 2012, Article ID 756023, 15 pages doi:10.1155/2012/756023.

López Jimeno, C y Otros. (1995). Manual De Arranque, Carga Y Transporte En Minería A Cielo Abierto, Madrid, Instituto Tecnológico de GeoMinero de España, Segunda Edición.

Martí, R., Reinelt, G. (2011). The linear Ordering Problem Exact and Heuristic Methods in Combinatorial Optimización, <http://www.springer.com/978-3-642-16728-7>.

Ministerio de Minas. (2013). Abecé de la negociación de la prórroga del contrato de la Nación con Cerro Matoso S.A. Bogotá.  
<https://www.minminas.gov.co/documents/10180/2984227/ABC-NegociacionContrato-Cerromatoso.pdf/c11a54ff-fdb2-4f7a-9f53-4d5b0585dcb9>.



Ministerio de Minas (2016). Análisis Delcomportamiento Del PIB Minero Cuarto Trimestre De 2015. Bogotá, <https://www.minminas.gov.co/boletines?idBoletin=257>.

Naoum, S., A. Haidar. (2000). A hybrid knowledge base system and genetic algorithms for equipment selection. *Engrg. Construction, Architectural Management* 7(1) 3–14.

Newman A, Rubio E, Caro R, Weintraub A, Eureka K. (2010). A review of operations research in mine planning. *Interfaces* vol 40 No.3, pp 222–245.

Rodríguez, D. (2013). Modelo analítico para el dimensionamiento de flota de transporte en minería a cielo abierto: análisis de prioridades de atención según rendimiento. Santiago de Chile, Pontificia Universidad Católica De Chile, Escuela De Ingeniería.

Sout32, Cerro Matoso, (2016), 2015 Reporte de Sostenibilidad, <http://www.fundacioncerromatoso.org/index.php/cerro-matoso/reporte-de-sostenibilidad-2015>

Souza, M. J. F., I. M. Coelho, S. Ribas, H. G. Santos, and L. H. C. Merschmann. (2010). A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning 207, 1041–1051.